



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TUOMAS NYBERG
SÄHKÖMAGNEETTINEN SUOJAUS

Diplomityö

Tarkastaja: professori
Pekka Ruuskanen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvoston kokouksessa 4. mar-
raskuuta 2015

TIIVISTELMÄ

TUOMAS NYBERG: Sähkömagneettinen suojaus

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 72 sivua, 0 liitesivua

Marraskuu 2015

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Elektroniikkatuotanto

Tarkastaja: professori Pekka Ruuskanen

Avainsanat: sähkömagneettinen suojaus, sähkömagneettinen säteily, sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähkömagneettisen säteilyn määrä on lisääntynyt uusien elektronisten laitteiden tultua osaksi jokapäiväistä elämäämme. Ongelmia syntyy kun laitteet vaikuttavat toistensa toimintaan normaalilla käytöllään. Valmistuksessa tuleekin ottaa huomioon sekä laitteen kyky sietää sähkömagneettista säteilyä että säteilyn määrä, jonka laite levittää ympäristöönsä. Paras keino varmistaa laitteen toiminta säteilyä sisältävässä ympäristössä on huolehtia sähkömagneettisesta suojauksesta.

Tämän diplomityön tavoitteena on perehdyttää lukija sähkömagneettisen säteilyn synnylle ja vaikutuksille modernissa ympäristössä. Työssä käydään läpi eri menetelmiä suojautua sähkömagneettiselta säteilyltä. Monet materiaalit suhtautuvat saapuvaan sähkömagneettiseen säteilyyn eri tavoin. Diplomityössä käsitellään moninaisten materiaalien käyttöä sähkömagneettisena suojana. Aineita myös muokataan vastaamaan paremmin sähkömagneettisen suojauksen tarpeita. Työ perehdyttää lukijan suojauksessa käytetyille termeille ja lyhenteille.

Diplomityössä käydään läpi eri tilanteita, missä sähkömagneettista suojausta tulee käyttää. Monet fysikaaliset ilmiöt vaikuttavat sähkömagneettiseen suojaukseen. Työssä tarkastellaan näiden ilmiöiden käyttöä ja hyödyntämistä osana suojausteknologiaa. Monet pienet yksityiskohdat ovat ratkaisevassa osassa sähkömagneettisen suojauksen sovelluksissa. Työn loppuosassa käydään läpi erinäisiä sähkömagneettista säteilyä tutkivia organisaatioita. Nämä organisaatiot omalta osaltaan vaikuttavat maakohtaiseen lainsäädäntöön sähkömagneettisessa suojauksessa. Työssä tarkastellaan yleisiä sähkömagneettisessa suojauksessa esiintyviä merkintöjä, standardeja ja määryksiä.

Diplomityön tavoitteena on esittää lukijalle sähkömagneettisen suojauksen tärkeys nykypäivän sovelluksissa. Ilman toimivaa suojausta ja säteilyhäiriön säteilyä ei monia jokapäiväisiä sähköisiä sovelluksia olisi olemassa.

ABSTRACT

TUOMAS NYBERG: Electromagnetic Shielding
Tampere University of Technology
Master of Science Thesis, 72 pages, 0 Appendix pages
November 2015
Master's Degree Programme in Electrical Engineering
Major: Electronics
Examiner: Professor Pekka Ruuskanen

Keywords: electromagnetic shielding, electromagnetic radiation, electromagnetic compatibility

The amount of electromagnetic radiation has increased due to new electrical devices becoming part of our everyday life. Problems arise when machines effect each other with their normal use. Devices ability to endure electromagnetic radiation should be part of the planning process. Best way to ensure the functionality of the device is to take care of the electromagnetic shielding.

The goal of this thesis is to familiarize the reader with the birth and effects of electromagnetic radiation in the modern environment. Many different ways to shield target from electromagnetic radiation are examined. Materials act differently when they are under electromagnetic radiation. Many different materials are examined in this thesis. Materials may also be modified to be better suited for electromagnetic shielding. Reader will be acquainted for many terms and abbreviations used in electromagnetics.

This thesis goes through different situations where electromagnetic shielding should be used. Variety of physical phenomena effect the shielding process. Their effect on shielding is examined. Variety of organizations have important role in electromagnetic shielding. These organizations influence the legislation and regulations used in electronics. Different markings, standards and regulations are being examined.

The purpose of this thesis is to give reader clear view of the usage of the electromagnetic shielding in modern applications. Without functioning shielding and limitations on electromagnetic radiation many common electrical devices would be out of order.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön tarkoituksena on perehdyttää lukija sähkömagneettisen suojauksen perusteisiin. Työssä selvitetään teoriaa sähkömagneettisen suojauksen pohjalta sekä tarkastellaan eri menetelmiä toteuttaa suojaus. Diplomityön keskivaiheilla lukija tutustutaan suojauksessa käytettäviin materiaaleihin. Lukijalle selvitetään sähkömagneettisen suojauksen merkitys eri sovelluksissa. Lopuksi työssä selvitetään eri virastojen ja direktiivien asettamia tavoitteita sähkömagneettiselle yhteensopivuudelle.

Haluan kiittää professori Pekka Ruuskasta avusta aiheen valinnassa sekä työn ohjauksesta. Suurin osa työssä käytetyistä materiaaleista löytyi Porin Tiedekirjastosta, jonka ystävällinen henkilökunta auttoi osaltaan työn valmistumisessa.

Porissa, 10.11.2015

Tuomas Nyberg

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖMAGNEETTINEN SUOJAUS	2
2.1	Suojauksen toiminta.....	2
2.1.1	Maxwellin yhtälöt	4
2.1.2	Heijastus	7
2.1.3	Absorptio	10
2.1.4	Taajuuden ja aallonpituuden yhteys.....	13
2.2	Sähkömagneettinen yhteensopivuus.....	14
2.3	Sähkömagneettinen häiriö	14
2.3.1	Luonnolliset häiriöt	15
2.3.2	Ihmisen aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt.....	15
2.4	Sähköstaattinen purkaus.....	15
2.5	Sähkömagneettinen pulssi.....	16
2.6	Säteilyn vaikutus ihmiseen.....	16
2.7	Suojauksen mittaaminen	17
3.	MATERIAALIT SÄHKÖMAGNEETTISESSA SUOJAUKSESSA	19
3.1	Metallit	19
3.1.1	Kupari.....	20
3.1.2	Alumiini	22
3.1.3	Hopea	23
3.2	Hiilikuidut	23
3.3	Hiilinanoputket.....	24
3.4	Sähköä johtavien partikkelien käyttö komposiiteissa.....	28
3.4.1	Finemet.....	29
3.5	Itseisjohtavat polymeerit	32
3.5.1	Polyaniliini	37
4.	KÄYTTÖKOHTEET	40
4.1	Digitaalisten laitteiden suunnittelu	40
4.1.1	Digitaalisten laitteiden suojaus	40
4.1.2	Faradayn häkki.....	41
4.1.3	Pyörrevirrat.....	42
4.1.4	Kaapeleiden suojaus.....	44
4.1.5	Piirien osiointi ja maadoitus	44
4.1.6	Suojakotelointi.....	45
4.2	Kankaat	47
4.3	Maalit	50
4.4	Ikkunoiden suojaus sähkömagneettiselta säteilyltä	51
4.5	Matkapuhelimet.....	51
4.6	Häiveteknologia.....	53

5. ORGANISAATIOT JA LAINSÄÄDÄNTÖ SÄHKÖMAGNEETTISESSA SUOJAUKSESSA	56
5.1 Organisaatiot sähkömagneettisessa suojauksessa.....	56
5.1.1 IEC	56
5.1.2 Tukes	56
5.1.3 Säteilyturvakeskus	57
5.2 EMC-direktiivi	57
5.3 CE-merkintä	57
5.4 EMC-standardit	58
6. YHTEENVETO.....	59
7. LÄHDE.....	61

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CISPR	Sähkömagneettisia radiohäiriöitä tutkiva komitea. (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques)
FSS	Taajuus valinnainen pinta (Frequency Selective Surface)
DIL	Kaksirivinen komponentti (Dual in-Line)
DNG	Kaksoinegatiivinen materiaali. Aineella on negatiivinen permittiivisyys ja permeabiliteetti. (Double Negative)
EMC	Sähkömagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility)
EMP	Sähkömagneettinen pulssi (Electromagnetic Pulse)
ESD	Sähköstaattinen purkaus (Electrostatic discharge)
HPM	Voimakas mikroaalto (High Power Microwave)
IEC	International Electromagnetic Commission
ITO	Indiumtinaoksidi
LHM	Sama kuin DNG
MWNT	Moniseinäinen nanoputki (Multiwalled Nanotube)
PANI	(Polyaniliini) Sähkömagneettisessa suojauksessa käytetty polymeeri
PPV	polyfenyleenivinyleeni
PPY	polypyrolli
PTT	Polytrimetyleeniteraftalaatin
RAM	Tutkasäteilyä absorboiva materiaali (Radar Absorbent Material)
RCS	Radar Cross Section. Ilmaisee kohteen tutkassa näkymisen
SAR-arvo	Radiotaajuuskenttien vaikutuksen tehokkuus ihmiseen
SE	Suojaustehokkuus (Shielding Effectiveness)
SESKO	Suomalainen sähköalalla toimiva standardoimisjärjestö
STUK	Säteilyturvakeskus
SMT	Pinnalle kiinnitettävä teknologia (Surface Mount Technology)
SWNT	Yksiseinäinen nanoputki (Singlewalled Nanotube)
TC77	Sähkömagneettista yhteensopivuutta tutkiva komitea IEC:N alaisuudessa
Tukes	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
δ	tunkeumasyvyys (m)
f	taajuus (Hz)
μ	permeabiliteetti (H/m)
σ	johtavuus (S/m)
Φ_E	sähkökentän vuo (Nm^2/C)
E	sähkökentän voimakkuus (V/m)
A	pinta-ala (m^2)
Q	varausten summa (C)
B	magneettivuon tiheys (T)
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti (H/m)
i_c	johtuva virta (A)
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys (F/m)
Φ_B	magneettivuo (Wb)
n	aineen taitekerroin
c	valon nopeus
v	säteilyn nopeus väliaineessa (m/s)

θ_r	heijastuneen säteilyn kulma pinnan normaalista
θ_a	saapuvan säteilyn kulma pinnan normaalista
θ_b	taittuneen säteilyn kulma pinnan normaalista
Z_w	saapuvan aallon impedanssi
Z_s	suojan impedanssin itseisarvo
A_{dB}	absorptiohäviö (dB)
t	aineen paksuus (m)
λ	aallonpituus (m)
H	Magneettikentän voimakkuus (A/m)
R	Kankaan resistanssi (Ω)
ρ	resistiivisyys(Ωm)

1. JOHDANTO

Sähkömagneettinen suojaus on eräs sähköisten laitteiden tärkeimmistä ominaisuuksista. Laitteiden tulee jatkaa normaalia toimintaansa standardien sisällä olevan sähkömagneettisen säteilyn läsnäolosta huolimatta. Samalla laitteen omaa säteilyn määrä ympäristöön tulee rajata. Ihmisen toiminnasta aiheutuvaa sähkömagneettista häiriötä on suurimmassa osassa elinympäristöämme. Tarkat säännöt varmistavat vanhojen ja tulevien laitteiden toiminnan ja turvallisen käytön myös tulevaisuudessa.

Sähkömagneettisen säteilyn vaimenemista materiaalissa tarkastellaan suojaustehokkuuskertoimen avulla. Tärkeimmät mekaniikat sähkömagneettisessa suojauksessa ovat heijastus ja absorptio. Materiaalin sähköiset ominaisuudet ja saapuvan sähkömagneettisen häiriön aallonpituus vaikuttavat absorptioon ja heijastuksen toimintaan suojana. Heijastumista tapahtuu suojamateriaalin rajapinnoilla. Absorptiolla tarkoitetaan sähkömagneettisen aallon vaimenemista aineen sisällä.

Suojamateriaalin valinta vaikuttaa suoraan käytettyyn suojausmekaniikkaan. Yleisimpiä sähkömagneettisia suojamateriaaleja ovat erilaiset metallit. Metallien lisäksi sähkömagneettinen suoja voidaan valmistaa myös sähköä johtavista muoveista. Muovit jaotellaan itsestään johtaviin sekä johtavia partikkeleita sisältäviin polymeereihin.

Monissa tapauksissa suojan tarkoitus on estää sähkömagneettisen säteilyn kulkua sekä laitteesta ulospäin, että ympäristöstä sähköiseen toimilaitteeseen. Laitteiden aiheuttamaan häiriöön on tehokkainta puuttua jo suunnitteluvaiheessa. Monikansalliset sekä maakohtaiset organisaatiot laativat rajat sähköisten toimilaitteiden aiheuttamalle sähkömagneettiselle säteilylle.

Tämän diplomityön tarkoituksena on perehdyttää lukija sähkömagneettisten suojien toimintaan. Lukija perehdytetään suojauksessa käytetyille termeille ja merkinnöille. Työssä tarkastellaan sähkömagneettisen häiriön syntyä ja säteilyn vaikutusta ympäristöön ja ihmiseen.

2. SÄHKÖMAGNEETTINEN SUOJAUS

Sähkömagneettisella suojauksella estetään laitteiden sähkömagneettinen vuorovaikutus ympäristön kanssa. Sähkömagneettinen energia voidaan käsittää monella eri tavalla. Staattisten ja ajan suhteen muuttuvien sähkö- ja magneettikenttien energiat aiheuttavat usein häiriöitä elektronisissa laitteissa. Elektroniset laitteet lähettävät itsessään sähkömagneettista energiaa, joka siirtyy ympäristöön säteilynä. Tarkempi sähkömagneettinen suojaus on usein tapauskohtaista, mutta noudattamalla määrättyjä sääntöjä voidaan suojauksen tasoa parantaa. (Neelakanta et al. 1995, s. 447)

Staattinen sähkökentän muutos johteessa aiheuttaa staattisen magneettikentän muutoksen. Muutoksen synty toimii myös toisin päin. Staattiset mallit ovat usein liian yksinkertaisia kuvaamaan tarkasteltua tilannetta. Staattiset kentät ilmaisevat sähkömagneettista toimintaa tarkastelupisteen läheisyydessä. Ottamalla ajan muutos huomioon, saadaan sähkö- ja magneettikentän yhteys näkyville laskennallisissa kaavoissa. Staattisten kenttien tapauksessa sähkö- ja magneettikenttien muutos katsotaan olevan vain seuraus toisen kentän muutoksesta ilman laskennallista perustelua. Ajan suhteen tarkasteltaessa sähkö- ja magneettikentän yhteys tulee ilmi Maxwellin yhtälöissä. Yhtälöt eivät rajoita sähkömagneettisen aallon taajuutta. (Cheng et al. 1993, s. 229, 263)

Suojausta rakennettaessa on otettava huomioon monia yksityiskohtia. Eräs tärkeimmistä valinnoista on suojausmateriaalin valinta. Valintaa ei voi suorittaa pelkästään suojaustehokkuus arvon pohjalta. Suojaustehokkuusarvosta käytetään nimitystä SE-arvo (Shielding Effectiveness). Materiaalin on kestävä ympäristön sille aiheuttamat rasitteet. Näitä ovat esimerkiksi lämpötila ja korroosio. Suojausta rakennettaessa tulee aina ottaa huomioon ongelmallisen säteilyn taajuus. Materiaalin suojaustehokkuus vaihtelee taajuuden funktiona. Harvinaisempien suojausmateriaalien tapauksessa myös hinta ja saatavuus vaikuttavat materiaalivalintaan. Mekaaniset vaatimukset, kuten joustavuus ja suoja-aineen paino tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. (Neelakanta et al. 1995, s. 447)

2.1 Suojauksen toiminta

Sähkömagneettisia suojamateriaaleja tarkasteltaessa tärkeinä yksikköinä esiintyvät impedanssi (Z) ja admittanssi (Y). Impedanssi ilmaisee materiaalin vaihtovirralla asettaman vastuksen. Suureen SI-yksikkö on ohmi (Ω). Impedanssi saadaan jakamalla sähkökentän intensiteetin arvo (E) magneettikentän intensiteetillä (H). Admittanssi on impedanssin käänteisarvo. Suojamateriaalin impedanssin tulee olla tarpeeksi suuri suhteessa aallon impedanssiin, jotta sähköinen suojaus voidaan katsoa riittäväksi. Vastaavasti suo-

jamateriaalin admittanssi arvo on tärkeässä osassa estettäessä magneettikentän vaikutusta suojan taakse. Materiaalivalinnan lisäksi myös suojan geometrinen muoto on ratkaisevassa osassa. Suojamateriaalin paksuus ja etäisyys säteilylähteestä ovat ratkaisevia tekijöitä. Suoja estää sähkömagneettista säteilyä heijastamalla säteilyä pinnastaan sekä mahdollistamalla säteilyn imeytymisen. Näistä mekanismeista käytetään nimityksiä heijastushäviö ja absorptiohäviö. (Neelakanta et al. 1995, s. 449)

Suojauksessa keskitytään usein ajan suhteen muuttuvia kenttiä vastaan. Kohde voidaan suojata staattisilta sähkökentiltä asettamalla johtava kappale suojattavan osion eteen. Staattisten kenttien tapauksessa ei tapahdu heijastus- tai imeytymishäviötä, vaan sähkökenttä pysähtyy johtavan kappaleen pintaan. Staattisten magneettikenttien vaikutusta voidaan estää suojaamalla kohde korkean permeabiliteetin omaavalla esteellä. Permeabiliteetti on arvo, joka ilmaisee materiaalin käyttäytymistä magneettikentässä. Staattisten kenttien tapauksessa suoja voidaan usein rakentaa yksityiskohtaisemmin, koska häiriö pysyy ajan suhteen muuttumattomana. (Neelakanta et al. 1995, s. 450)

Suojan tehokkuuden voidaan todistaa riippuvan kolmesta asiasta. Suojan impedanssin suhde saapuvan aallon impedanssiin on ratkaiseva tekijä. Suojan paksuus vaikuttaa suoraan materiaalissa tapahtuvaan sähkömagneettisen aallon absorptioon. Suoja-aineen vaimentumisvakioista käytetään merkintää α . Arvo saadaan ottamalla neliöjuuri piin, taajuuden, permeabiliteetin ja johtavuuden tulosta. Sähkömagneettisen suojan toiminta riippuu sähköisen ja magneettisesta energian heijastumisesta suojan pinnalta sekä sähköisen energian imeytymisestä suojaa aineeseen. (Neelakanta et al. 1995, s. 450)

Vaimentumisvakion avulla saadaan myös selville tunkeutumissyvyys. Tällä tarkoitetaan matkaa, jonka aikana aineeseen saapunut aalto on vaimentunut kertoimella 0,368. Kerroimen arvo on Neperin luvun käänteisluku. Korkean taajuuden omaava sähkömagneettinen säteily vaimenee nopeasti johtavassa aineessa. Kaavassa (1) on esitetty tunkeumasyvyyden selvittäminen taajuuden, permeabiliteetin ja johtavuuden avulla. (Cheng et al. 1993, s. 292)

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

jossa

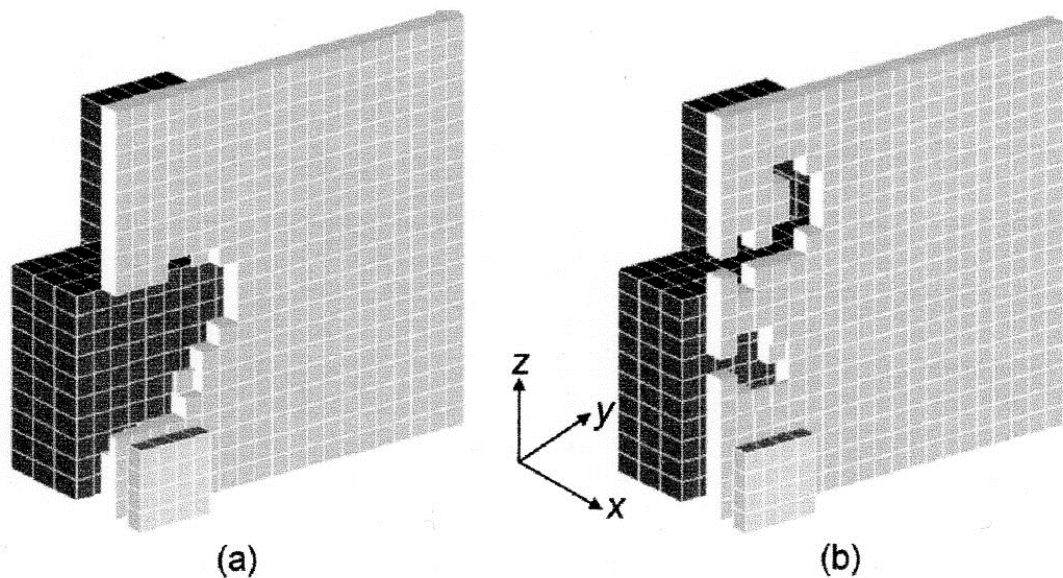
δ = tunkeumasyvyyys (m)

f = taajuus (Hz)

μ = permeabiliteetti (H/m)

σ = johtavuus (S/m)

Sähkömagneettisen suojan muodolla on suora vaikutus suojaustehokkuuteen. Takahashi et al. etsivät parasta mahdollista muotoa magneettiselle ja sähkömagneettiselle suojalle käyttäen ON/OFF-metodia. Menetelmässä suoja jaetaan useaan pieneen yksikköön. Menetelmä suoritetaan tietokoneen avulla. Ohjelma laskee jokaisen pienen yksikön kohdalla tuleeko kyseiseen kohtaan sijoittaa suojamateriaalia vai onko tyhjä kohta suojan kannalta tehokkaampi ratkaisu. Korkean johtavuuden omaava suojamateriaali tarjoaa reitin pyörrevirroille, jotka vastustavat lisättyä magneettikenttää. Menetelmää käyttämällä voidaan ottaa samaan aikaan huomioon suojan magneettinen vastus ja sähköjohtavuus. Kuvassa 2.1 on esitetty sähkömagneettisen suojan muodostus ON/OFF-menetelmällä. Suojan optimaalisen topologian selvittäminen osoittautui erittäin hitaaksi prosessiksi. Suojan tehokkuus on myös laskettava erikseen usealla taajuudella. Takahashi et al. käyttivät yhden taajuuden selvittämiseen 883 tuntia käyttäen 2,67GHZ:in kellotaajuudella toimivaa tietokonetta. (Takahashi et al. 2010, s. 3153–3156)



Kuva 2.1. Kuvassa a) on esitetty laskennallisesti tehokkain sähkömagneettinen suoja (valkoiset neliöt). Kuvassa b) suoja on suunniteltu ainoastaan magneettikenttää vastaan vastaan. (Takahashi et al. 2010, s. 3155)

2.1.1 Maxwellin yhtälöt

Monet sähkömagneetiikkaa koskevista matemaattisista ongelmista voidaan ratkaista Maxwellin yhtälöiden avulla. Nämä neljä yhtälöä eivät ole James Maxwellin kehittämiä, mutta hän ymmärsi yhteyden laskutapojen välillä ja loi käsityksen sähkömagneettisten aaltojen luonteesta.

Gaussin lait magneetti- ja sähkökentille ovat ensimmäiset Maxwellin yhtälöistä. Gaussin laki magneettikentille on esitetty kaavassa (2). Kyseinen laki esittää sähkökentän syntymisen yhteyden suljetulla pinnalla esiintyviin sähkövarauksiin. Sähkökentän vuo suljetun pinnan läpi on varausten summa jaettuna tyhjiön permittiivisyydellä. Suljetusta pinnasta käytetään välillä nimitystä Gaussin pinta (Gaussian Surface). Gaussin laki ei tarvitse materiaalista valmistettua pintaa toimiakseen, vaan kyseinen osa on imaginaarinen. (Young et al. 2004, s. 846, 1131)

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad \text{Gaussin laki} \quad (2)$$

jossa

Φ_E = sähkökentän vuo (Nm²/C)

E = sähkökenttä (V/m)

A = pinta-ala (m²)

Q = varausten summa (C)

ϵ_0 = tyhjiön permittiivisyys ($\frac{F}{m}$)

Toinen Maxwellin yhtälöistä käsittelee magneettikenttiä. Kaavan (3) mukaan magneettikentän vuo suljetun pinnan läpi on aina nolla. Kaavaa kutsutaan Gaussin laiksi magneettikentille. Kaavasta voidaan päätellä, että ei ole olemassa yksittäisiä magneettisia lähteitä magneettikentälle. Magneettikentän linjoille ei voida esittää loppupistettä, vaan ne muodostavat aina täyden silmukan. Jokainen pinnan läpi kulkeva magneettikentän linja myös poistuu pinnalta. Linjojen yhteenlaskettu summa on nolla. (Young et al. 2004, s. 1027)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{Gaussin laki magneettikentille} \quad (3)$$

jossa

B = magneettivuon tiheys (T)

A = pinta-ala (m²)

Kolmas Maxwellin yhtälöistä on versio Ampèren laista. Yhtälön mukaan johtuva virta ja siirrosvirta aiheuttavat magneettikentän syntymisen (kaava 4). Alkuperäinen Ampèren laki ei ottanut huomioon ajan suhteen muuttuvia kenttiä.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i_c + \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad \text{Ampèren laki} \quad (4)$$

jossa

B = magneettivuon tiheys (T)

μ_0 = tyhjiön permeabiliteetti (H/m)

i_c = johtuva virta (A)

ε_0 = tyhjiön permittiivisyys (F/m)

Φ_E = sähkökentänvuo (Nm^2/C)

Faradayn laki on neljäs Maxwellin yhtälöistä (Kaava 5). Lain mukaan sähkökentät syntyvät magneettikentän tai sen vuon muutoksista.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{Faradayn laki} \quad (5)$$

jossa

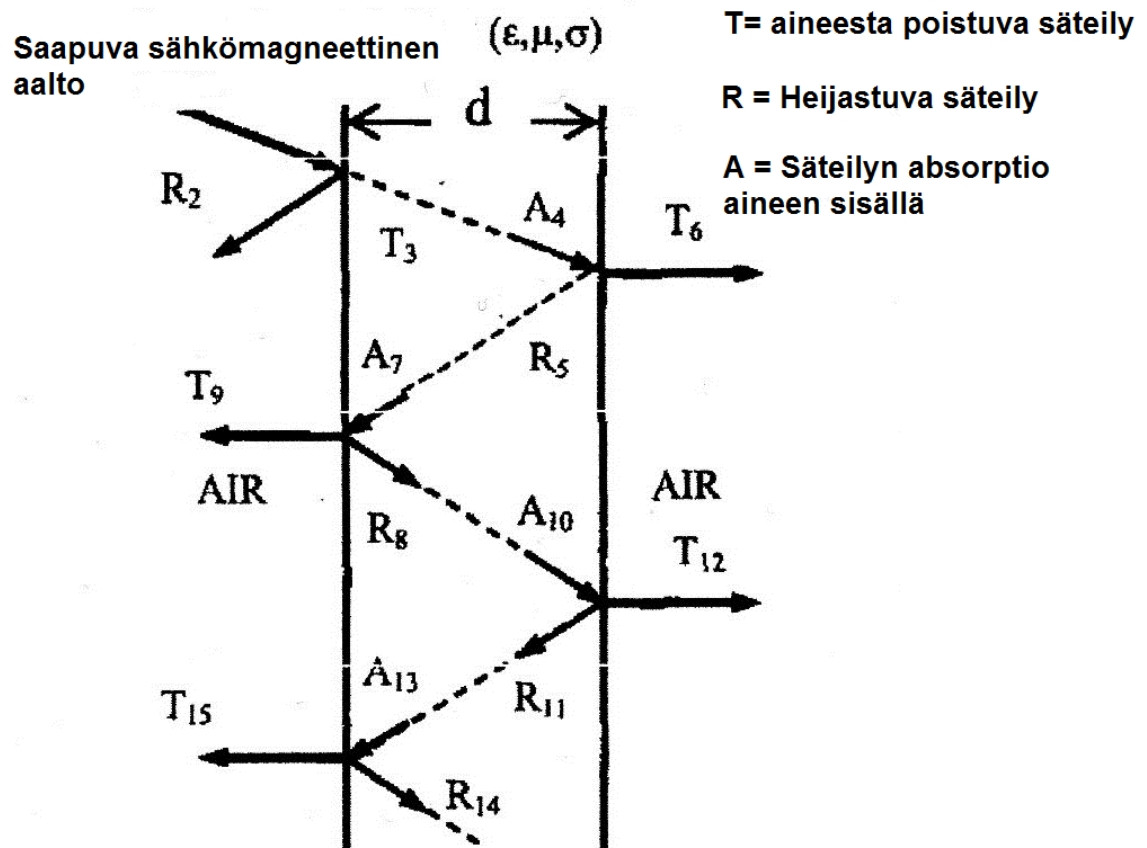
E = sähkökenttä (V/m)

Φ_B = magneettivuo (Wb)

Maxwellin yhtälöt mahdollistavat sähkömagneettisen säteilyn käsitteen ymmärtämisen. Tyhjiössä tarkasteltaessa Gaussin laki sekä Gaussin laki magneettikentille saavat saman muodon, eronaan ainoastaan tarkastellaanko sähkö- vai magneettikenttää. Ampèren lain ja Faradayn lain yhteys on myös nähtävissä. Muutos sähkökentän vuossa synnyttää magneettikentän sekä vastaavasti muutos magneettikentän vuossa aiheuttaa sähkökentän. (Young et al. 2004, s. 1027)

2.1.2 Heijastus

Reflektiolla tarkoitetaan sähkömagneettisten aaltojen yhteydessä aallon heijastumista rajapinnasta. Heijastuminen on yksi tärkeimmistä tavoista suojata haluttua kohdetta sähkömagneettiselta säteilyltä. Monissa suojuissa on monta kerrosta, joten sähkömagneettisen säteilyn heijastumista voi tapahtua suojan vaikutuksesta useita. Materiaalin sisällä voi tapahtua uudelleenheijastumisia monta kertaa saman aallon vaikutuksesta. Kuvassa 2.2 on tarkasteltu suojan sisällä tapahtuvia uudelleen heijastumisia. (Young et al. 2004, s. 1251)



Kuva 2.2. Sähkömagneettisen aaltoliikkeen eteneminen aineessa ja sen rajapinnoilla. (Badic et al. 2003, s. 517)

Heijastuksen tyyppi riippuu suuresti rajapinnan tasaisuudesta. Epätasainen pinta heijastaa saapuneita aaltoja moniin eri suuntiin. Tasaisen pinnan tapauksessa puhutaan peiliheijastuksesta. Säteily liikkuu eri aineissa eri nopeuksilla. Säteilyn tullessa rajapintaan osa säteilystä saattaa vaihtaa suuntaa ja taittua sisään materiaaliin. Jokaisella aineella on ominainen taitekerroin n , joka saadaan jakamalla valon nopeus tyhjiössä nopeudella, jolla säteily etenee kyseisessä aineessa (kaava 6). Materiaalin pinnasta heijastuneen säteilyn kulma suhteessa rajapinnan normaaliin on sama kuin saapuvan säteilyn kulma rajapinnan normaaliin (kaava 7). (Young et al. 2004, s. 1252)

$$n = \frac{c}{v} \quad (6)$$

jossa

n = aineen taitekerroin

c = valon nopeus

v = säteilyn nopeus väliaineessa

$$\theta_r = \theta_a \quad (7)$$

jossa

θ_r = heijastuneen säteilyn kulma pinnan normaalista

θ_a = saapuvan säteilyn kulma pinnan normaalista

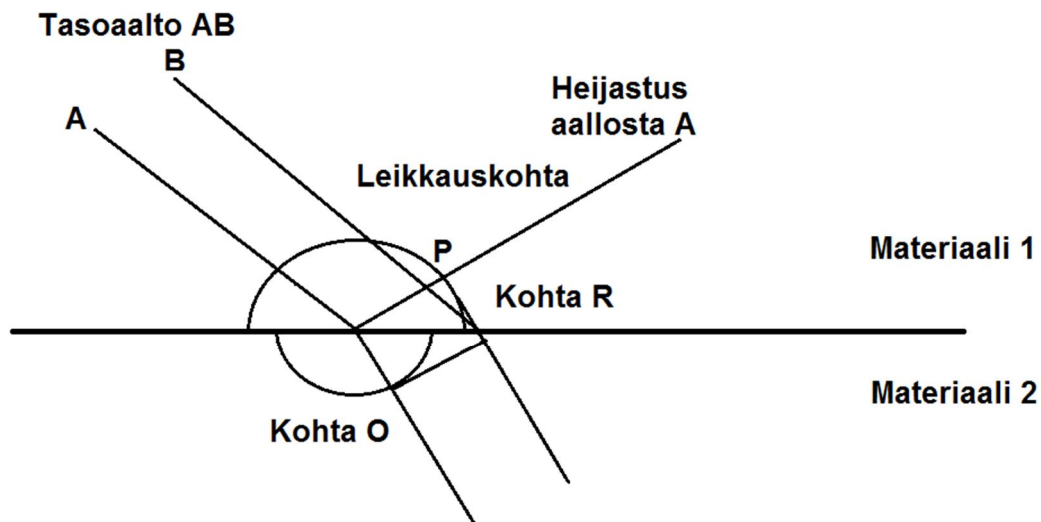
Sähkömagneettisen aallon taittumista materiaaliin voidaan tarkastella taittumislailalla (kaava 8). Lakia kutsutaan usein keksijänsä mukaan myös Snellin laiksi. Sääntö sitoo yhteen säteilyn saapumiskulman, taittumiskulman sekä aineiden taitekertoimet. Taitekulman ollessa suora, kääntyy taittuva säde rajapinnan suuntaiseksi. Kaikki kriittistä kulmaa suuremmat arvot aiheuttavat tilanteessa kokonaisheijastuksen. Kokonaisheijastuksen tapauksessa rajapinnan läpi ei kulje säteilyä, vaan säteily taittuu kokonaisuudessaan poispäin rajapinnasta. Kokonaisheijastuksen hyödyntäminen on tärkeä osa sähkömagneettista suojausta. (Young et al. 2004, s. 1257)

$$n_a \cdot \sin \theta_a = n_b \cdot \sin \theta_b \quad \text{Snellin laki} \quad (8)$$

jossa

θ_b = taittuneen säteilyn kulma pinnan normaalista

Valon heijastuminen rajapinnasta noudattaa Huygensin periaatetta. Jokaista rajamateriaaliin törmäävää aaltorintaman pistettä pidetään uuden pallonmuotoisen aallon alkupisteinä. Uuden aaltorintaman suunta määräytyy palloaaltojen pinnan tangentista. Kuvassa 2.3 on esitetty periaatteen toiminta. Snellin laki on johdettavissa Huygensin periaatteen avulla. Eräs Huygensin periaatteesta johtuva ilmiö on kuumassa ilmanalassa esiintyvät kangastukset. (Ruuskanen 2014a, s. 29, Hellier et al. 2003 mukaan), (Young et al. 2004, s. 1274)



Kuva 2.3. Huygensin periaatteen mukaan aalto A saavuttaa rajapinnan kohdan O ennen kuin aalto B saavuttaa kohdan R. Pisteestä O heijastunut aalto leikkaa palloaallon kohdassa P.

Suojauksen tehokkuus riippuu sekä heijastumisesta että absorptiosta. Monet sähkömagneettiset suojat sisältävät useita rajapintoja, joten aineen sisällä tapahtuu uudelleenheijastumisia. Heijastuksen tehokkuus on verrannollinen saapuvan aallon ja suojamateriaalin impedansseihin (kaava 9). Impedanssi ja heijastuksen tehokkuus ovat riippuvaisia saapuvan aallon taajuudesta. Matalilla taajuuksilla heijastuminen on absorptiota tärkeämmässä osassa sähkömagneettisessa suojauksessa. Monta kertaa suojan sisällä heijastunut säteily vaikuttaa vain niissä tapauksissa, joissa suojan paksuus on pienempi kuin aineen tunkeutumisvyvyys. (Oussaid 2010, s. 1)

$$R_{db} = 20 \log \frac{Z_w}{4Z_S} \quad (9)$$

jossa

R_{db} = heijastushäviö (dB)

Z_w = saapuvan aallon impedanssi

Z_s = suojan impedanssin itseisarvo

2.1.3 Absorptio

Absorptiolla tarkoitetaan säteilyn vaimenemista materiaalissa. Suojamateriaalin sähkömagneettinen energia voi muuttua lämpösäteilyksi materiaalissa. Eräs tärkeimmistä suu- reista puhuttaessa säteilyn vaimenemisesta on tunkeumasyvyyys δ (m). Aineille ja saapu- valle aallolle ominaisen tunkeumasyvyyden voi laskea kaavan (1) avulla. Tun- keumasyvyyden ja suojan paksuuden avulla voidaan selvittää vaimenemisesta aiheutuneet häviöt (kaava 10). (Shielding Theory 2015), (Cheng et al. 2003, s. 292)

$$A_{dB} = 20 \log e^{\frac{-t}{\delta}} \quad (10)$$

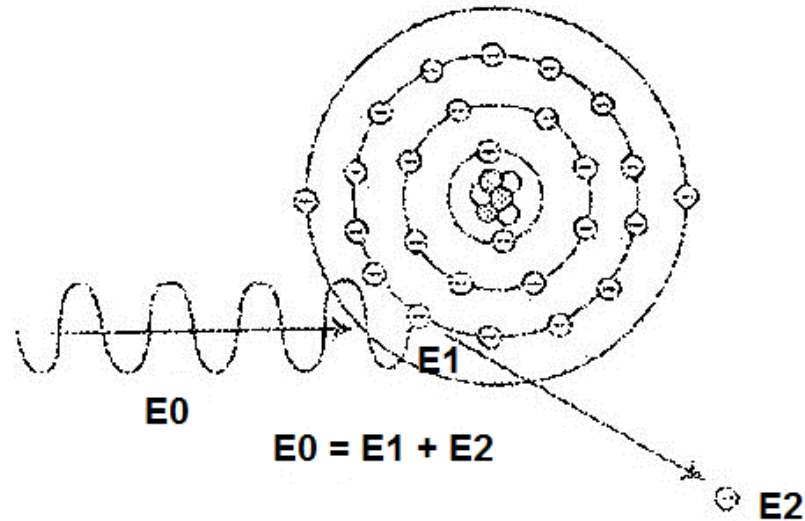
jossa

A_{dB} = absorptiohäviö (dB)

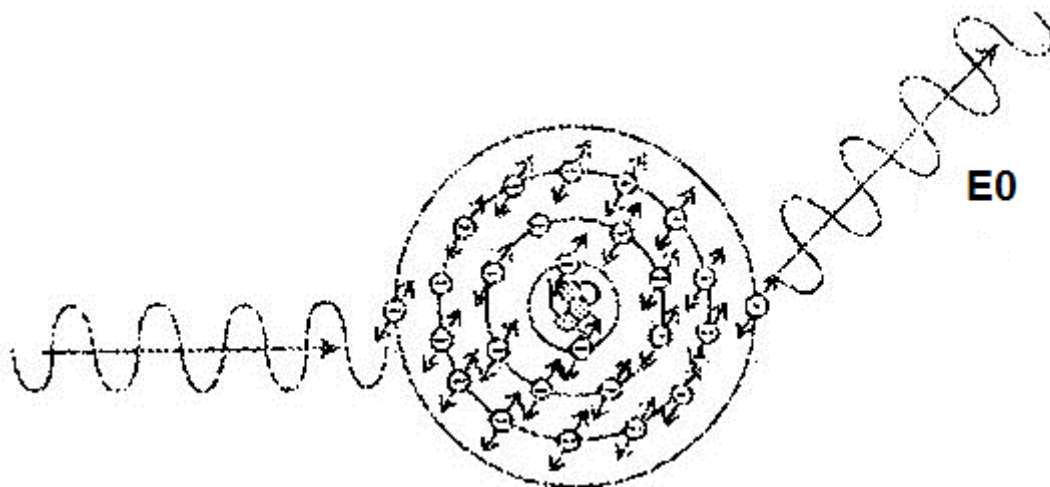
t = aineen paksuus (m)

δ = tunkeumasyvyyys (m)

Syyt säteilyn vaimenemiseen aineessa tapahtuvat atomitasolla. Fotosähköisessä vaimenemisessä fotonit luovuttaa kaiken energiansa aineen elektronille. Sähkömagneettisen aallon energiaa kuluu sekä elektronin irrottamiseen että syntyvään liikkeeseen. Kuvassa 2.4 on esitetty fotosähköisen vaimenemisen periaate. Rayleighin sironnassa säteily vuo- rovaikuttaa suoraan atomin elektronien kanssa. Fotonit muuttavat kulkusuuntaa osues- saan atomin elektroneihin. Rayleigh sironna on esitetty kuvassa 2.5. Noin 20 % koko- naisvaimenemisesta tapahtuu Rayleighin sironnan ansiosta. (Ruuskanen 2014a, s. 101, Hellier et al. 2003 mukaan)

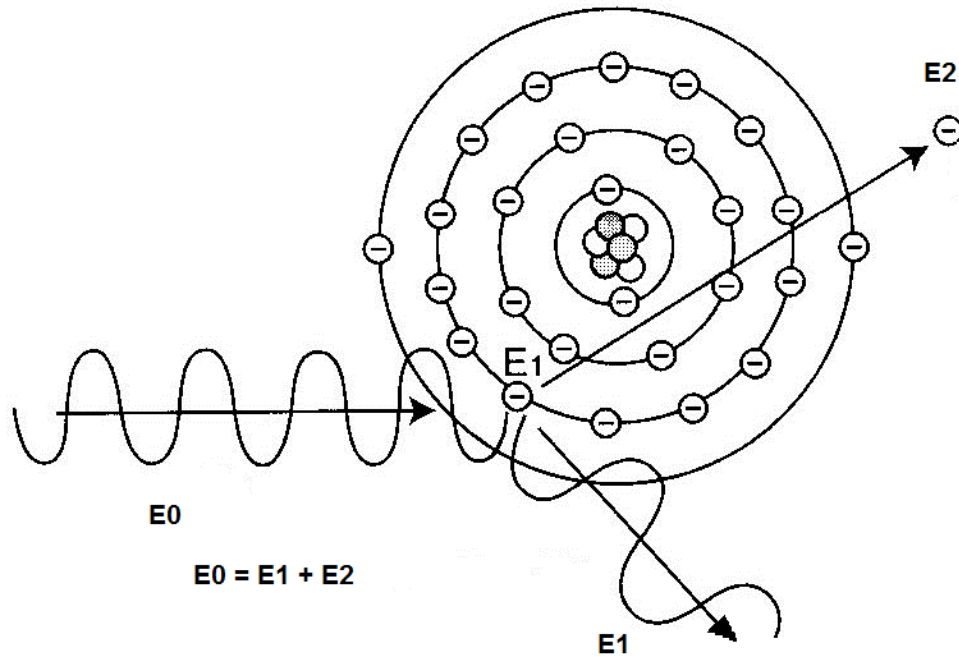


Kuva 2.4. Fotosähköinen vaimeneminen. (Ruuskanen 2014a, s. 101, Hellier et al. 2003 mukaan)



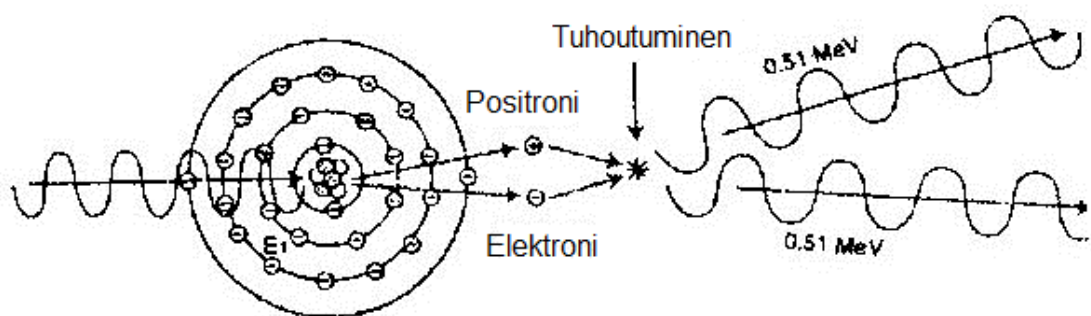
Kuva 2.5. Rayleighin sironta. (Ruuskanen 2014a, s. 101, Hellier et al. 2003 mukaan)

Comptonin siroonnassa tapahtuu suoraa vuorovaikutusta atomin elektronien ja säteilyn fononien välillä. Fononit ovat hilavärähtelyn kvantteja. Compton-sironnan vaikutuksesta elektroni irtaantuu atomista ja aineeseen osunut fotoni siroaa uuteen suuntaan. Kuvassa 2.6 on tarkasteltu Comptonin sirontaa atomissa. Compton-sirontaa tapahtuu 0,1-3,0 MeV energiavälillä. (Ruuskanen 2014a, s. 101, Hellier et al. 2003 mukaan)



Kuva 2.6. Comptonin sironta. (Ruuskanen 2014a, s. 101, Hellier et al. 2003 mukaan)

Mikäli fotoni törmää atomin ytimen kanssa saattaa seurauksena olla parin muodostus. Parin synty edellyttää fotonilta yli 1,02 MeV energiaa. Törmäyksen seurauksena syntyvät elektroni ja positroni. Parin muodostuksessa elektroni ja positroni tuhoutuvat. Seurauksena syntyy kaksi 0,51 MeV fotonia. Kuvassa 2.7 on esitetty parin muodostus törmäyksen seurauksena. (Ruuskanen 2014a, s. 101, Hellier et al. 2003 mukaan)



Kuva 2.7. Parin muodostuminen. (Ruuskanen 2014a, s. 101, Hellier et al. 2003 mukaan)

2.1.4 Taajuuden ja aallonpituuden yhteys

Sähkömagneettinen häiriö saapuu systeemiin joko johtumalla tai säteilyinä. Häiriön taajuudella on suuri vaikutus laitteen sähkömagneettisen suojauksen tehokkuuteen. Taajuuden ollessa alle 30 MHz suurin osa häiriöstä saapuu johtumalla. Vastaavasti taajuuden ylittäessä 30 MHz:n arvon säteilyn osuus yleensä kasvaa. (Storey et al. 2006, s. 336)

Sähkömagneettinen säteily on jaoteltu aallonpituuden ja taajuuden mukaan sähkömagneettiseksi spektriksi. Aaltoja, joiden taajuus on suurempi kuin 1GHz kutsutaan mikroaalloiksi. Näihin kuuluvat gammasäteily, röntgensäteily, ultravioletti, näkyvä valo sekä osa infrapuna-alueen säteilystä. Gamma- ja röntgensäteilyä käytetään pääasiassa lääketieteen yhteydessä. Näkyvän valon aallonpituus on välillä 380–720 nm. Suuremman aallonpituuden omaavia aaltoja käytetään usein kommunikaation ja erityylisten sensorien yhteydessä. (Cheng et al. 1993, s. 265)

Taajuuden ja aallonpituuden yhteys on esitetty kaavassa 11. Sähkömagneettisen säteilyn etenemisnopeus riippuu läpäistävän aineen taitekertoimesta (kaava 12). Aaltoliikkeen taajuus pysyy vakiona säteilyn kohdatessa uuden väliaineen. Mikäli uuden väliaineen taitekerroin on suurempi kuin edellisen väliaineen, laskee myös aallon etenemisnopeus. Taajuuden pysyessä samana aallonpituus muuttuu väliaineen mukaan. Aallonpituuden pienentyessä aallon etenemisnopeus hidastuu. (Young et al. 2004, s. 1254)

$$v = \lambda f \quad (11)$$

jossa

v = aallon etenemisnopeus (m/s)

λ = aallonpituus (m)

f = taajuus (Hz)

$$n = \frac{c}{v} \quad (12)$$

jossa

n = taitekerroin

c = valonnopeus (m/s)

v = aallon etenemisnopeus (m/s)

2.2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähkömagneettisella yhteensopivuudella tarkoitetaan mallia, jossa jokaisen sähkölaitteen toiminta pyritään varmistamaan ulkoisista ja sisäisistä häiriölähteistä huolimatta. Kaikki sähkölaitteet lähettävät häiriösäteilyä, mutta tarkalla suunnittelulla, suojauksella sekä sopivilla materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa laitteisiin kohdistuviin sähkömagneettisiin ongelmiin. Sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (engl. Electromagnetic Compatibility) käytetään usein lyhennettä EMC. Yhteensopivuuden ongelmat voidaan jakaa kolmeen eri osioon. Ulkoisen laitteen aiheuttama sähkömagneettinen kenttä voi häiritä tarkasteltavan laitteen toimintaa. Tarkasteltava laite saattaa aiheuttaa sisäistä häiriötä muihin osioihinsa. Viimeisenä ongelmana on tarkasteltavan laitteen aiheuttama häiriö muissa toimilaitteissa. (Storey et al. 2006, s. 333)

Monet häiriötilanteet ovat ratkaistavissa yksinkertaisesti lisäämällä välimatkaa häiriölähteen ja häiriölle herkän laitteen välillä. Mikäli kyseessä on laitteen sisäinen häiriö, on ongelma usein ratkaistava muuttamalla virtapiirejä. Eräs yksinkertaisimpia häiriöiden syntytapoja on yhteisistä virtapoluista ja impedanssista johtuva häiriö. Korkeaa taajuutta käyttävät laitteet ovat matalataajuisia herkempiä tämän tyylliselle oskillaatiolle. Häiriö voidaan poistaa antamalla jokaiselle laitteelle oma reitti maapotentiaaliin. Ratkaisu kasvattaa yleensä laitteen kokoa ja lisää sähköisten vetojen määrää. (Williams et al. 2001, s. 154.)

Magneettista induktiota tapahtuu vaikka lähekkäiset laitteet eivät olisi suoraan yhteydessä toisiinsa. Induktion voimakkuus riippuu virtasilmutkoiden määrästä, välimatkasta, sijaintikulmasta sekä magneettisesta suojauksesta. Sähköistä induktiota tapahtuu jännitteen vaihtuessa johtimissa. Syntynyt sähkökenttä saattaa aiheuttaa jännitteen muutosta lyhyen välimatkan päässä olevissa johteissa. Magneettisen parin katsotaan laskennallisesti olevan sarjassa toistensa kanssa ja sähköisten parien rinnan. Impedanssin, eli laitteen vaihtovirralla aiheuttaman vastuksen muutos vaikuttaa laskennallisesti kummassakin tapauksessa. Korkea impedanssi lisää sähköistä vuorovaikutusta laitteiden välillä ja vähentää magneettista vuorovaikutusta. Matalan impedanssin vaikutus on päinvastainen. Yhteyttä voidaan käyttää myös toisinpäin. Sisäisestä impedanssista voidaan päätellä laitteiden herkkyys eri häiriöille. (Williams et al. 2001, s. 155)

2.3 Sähkömagneettinen häiriö

Laitteiden herkkyyttä sähkömagneettisille häiriöille ilmaistaan sähkömagneettisella susceptibiliteetilla. Systeemin susceptibiliteetti annetaan paljaana lukuna ilman yksikköä. Sähkömagneettinen susceptibiliteetti ilmaisee kuinka helposti säteily pääsee sisään laitteeseen ja missä vaiheessa säteily alkaa vaikuttamaan negatiivisesti laitteen toimintaan. Susceptibiliteetin sijaan voidaan puhua myös sähkömagneettisesta immunitetista, mikä ilmaisee laitteen virheetöntä toimintaa sähkömagneettisen häiriön alaisena. (Storey et al. 2006, s. 336)

Monimutkaisemmissa elektronissa laitteissa sähkömagneettinen häiriö siirtyy sekä säteilyä että johtumisella. Johtumista tapahtuu yleisesti sisään- ja ulostulo johtimissa sekä voimakkaapeleissa. Säteilyä siirtyy ympäristöön myös suoraan laitteen kotelon läpi. Pitkät linjat laitteen osioiden välillä aiheuttavat myös sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettinen suojaus toimii usein kumpaankin suuntaan. Reitit, jota pitkin säteily poistuu systeemistä toimivat myös sisääntulo reitteinä häiriölle. (Storey et al. 2006, s. 336)

2.3.1 Luonnolliset häiriöt

Eräs yleisimmistä häiriötä aiheuttavista ilmiöistä on salamanisku. Salaman osuminen suoraan elektroniseen laitteeseen on harvinaista, joten suojautumisessa keskitytään muun muassa ylijännitteen aiheuttamiin ongelmiin. Salamit aiheuttavat myös korkeataajuisia häiriötä suurella alueella ilmakehässä. (Storey et al. 2006, s. 334)

Muita luonnollisia häiriölähteitä ovat auringon purkaukset sekä kosminen taustasäteily. Soihdut ovat purkauksia auringon pinnalla. Ne ovat havaittavissa häiriönä radio- ja satelliittiyhteyksissä. Kosminen säteily ilmenee taustahäiriönä korkeilla yli 100 Mhz taajuuksilla. (Storey et al. 2006, s. 334)

Maapallolla esiintyy nestemäisen ytimen vaikutuksesta syntynyt staattinen tai hitaasti muuttuva magneettikenttä. Kenttä on voimakkain magneettisilla pohjois- ja etelänavoilla. Magneettikenttä on mahdollistanut elämän, sillä se suojaa maapalloa kosmiselta säteilyltä. Auringon hiukkassäteily aiheuttaa muuttuvia kenttiä ionosfäärissä. Suuria muutoksia sanotaan magneettisiksi myrskyiksi. (Jokela et al. s. 5)

2.3.2 Ihmisen aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt

Ihmisen toiminnasta aiheutuvat häiriöt voidaan jakaa kahteen kategoriaan. Tarkoituksen mukaisia häiriöitä ovat esimerkiksi radioiden ja tutkien aiheuttamat häiriöt. Sähkömagneettiset kentät ovat osa laitteen normaalia toimintaa. Monien muiden laitteiden tapauksessa kentät ovat osa toiminnasta aiheutuvaa häiriötä, joka säteilee ympäristöön. (Jokela et al. s. 3)

2.4 Sähköstaattinen purkaus

Sähköstaattinen purkaus esiintyy useimmiten hankaussähkön muodossa. Purkaus esiintyy useimmiten pienenä kipinäinä ihmisen koskettaessa johtavaa pintaa. Tilanne on ihmiselle vaaraton, mutta voi rikkoa herkkiä elektronisia komponentteja. (Storey et al. 2006, s. 335)

Sähköstaattista purkausta vastaan on kehitetty monia materiaaleja. Antistaattiset materiaalit vähentävät staattisen varauksen syntyä monella tavalla. Eräs tärkeimmistä tekijöistä on kitkan vähentäminen materiaalien rajapinnalla. Antistaattiset materiaalit lisäävät

päällystetyn pinnan ominaisvastusta näin hajottaen syntyneitä varauksia. Suoja vuorovaikuttaa ympäristössä jo olevien staattisten varausten kanssa. Aineita, joihin staattinen varaus siirtyy huonosti, sanotaan staattisuutta hajottaviksi aineiksi. Johtavia suojia voidaan käyttää siirtämään syntynyt varaus maahan. (Neelakanta et al. 1995, s. 421)

Ilman kosteus vaikuttaa suuresti staattisten purkausten syntyyn. Kosteus vähentää pinnan ominaisvastusta ja vähentää staattisten varausten syntyä. Vastaavasti kuivuus ja kosteuden materiaalin pinnalta poistava tuulen vire lisäävät sähköstaattisen purkauksen riskiä. (Neelakanta et al. 1995, s. 423)

2.5 Sähkömagneettinen pulssi

Sähkömagneettinen pulssi syntyy ydinräjähdysten seurauksena ilmakehässä. Pulssin vaikutusalue on huomattavasti suurempi kuin itse räjähdysten. Suojautuminen sähkömagneettista pulssia vastaan koskee lähinnä armeijassa käytettävää elektroniikkaa. (Storey et al. 2006, s. 336)

2.6 Säteilyn vaikutus ihmiseen

Sähkömagneettisen säteilyn vaikutusta ihmiseen on tutkittu laajalti. Kentän vaikutuksesta ihmiseen käytetään termiä altistuminen. Haittavaikutusta selvitetään säteilyn suoralla vaikutuksella ihmisen kudoksiin. Altistumisen määrä riippuu monesta tekijästä. Vaikuttavia suureita ovat esimerkiksi virrantiheys, pintasähkökenttä ja tehotiheys. Radiotaajuuskenttien vaikutusta ihmiseen mitataan SAR-arvolla (W/kg). Pitkäaikainen altistuminen aiheuttaa hermostimulaatiota ja kudosten lämpötilan nousua. Unihäiriöt ja päänsärky voivat olla seurausta altistumiselle. Vakavimpia pitkäaikaisesta altistumisesta aiheutuvia tapauksia ovat erilaiset syövät sekä mahdollinen keskenmeno. (Jokela et al. s. 2), (Al-Shabib et al. 2013, s. 836)

Eräs vähemmän tutkittu osuus säteilystä on välitaajuisten (300 Hz – 100 kHz) säteilyn vaikutus elollisiin olentoihin. Vahvoja välitaajuisia kenttiä syntyy muun muassa induktiokuumentimissa, hitsauslaitteissa, hakkuriteholähteissä ja pienemmässä määrin myös näyttöpäätteissä ja televisioissa. Välitaajuus kentät vaikuttavat kudokseen pääasiassa stimuloimalla. Ylitettäessä 100 kHz:n taajuus alkaa kudosten lämpötila nousta säteilyn vaikutuksesta. Monet testit ovat antaneet ristiriitaisia tuloksia välitaajuuskenttien vaarallisuudesta ihmiselle. (Juutilainen et al. s. 250)

Välitaajuuskenttiä käytetään myös lääketieteessä. Pulssimaisten magneettikenttien on havaittu vaikuttavan suotuisasti vaikeiden luunmurtumien yhteydessä. Stimulaatio nopeuttaa paranemisprosessia lisäämällä solujen kasvua ja aineenvaihduntaa. Tarkemmat tulokset taajuuden ja kentänvoimakkuuden vaikutuksista kudokseen välitaajuuskentillä ovat vielä tutkimatta. Tutkimusten vähyys, hajanaisuus ja vaikea toistettavuus ovat hi-

dastaneet välitaajuuskenttien aiheuttamien vaikutusten selvittämistä. (Juutilainen et al. s. 255)

2.7 Suojauksen mittaaminen

Suojauksen tehokkuudella tarkoitetaan kuinka paljon suojan lisääminen vähentää sähkömagneettista säteilyä kohteessa. Käytännössä tämä tarkoittaa mittauksen suorittamista ilman suojaa sekä uudestaan suojan kanssa. Kaavassa 13 on esitetty suojaustehokkuuden laskeminen sähkömagneettiselle säteilylle. (Wong et al. s. 110)

$$\begin{aligned} (SE)_{db} &= 20 \log_{10} (E_1 / E_2) \\ &= 20 \log_{10} (H_1 / H_2) \end{aligned} \tag{13}$$

jossa

SE Suojauksen Tehokkuus (db)

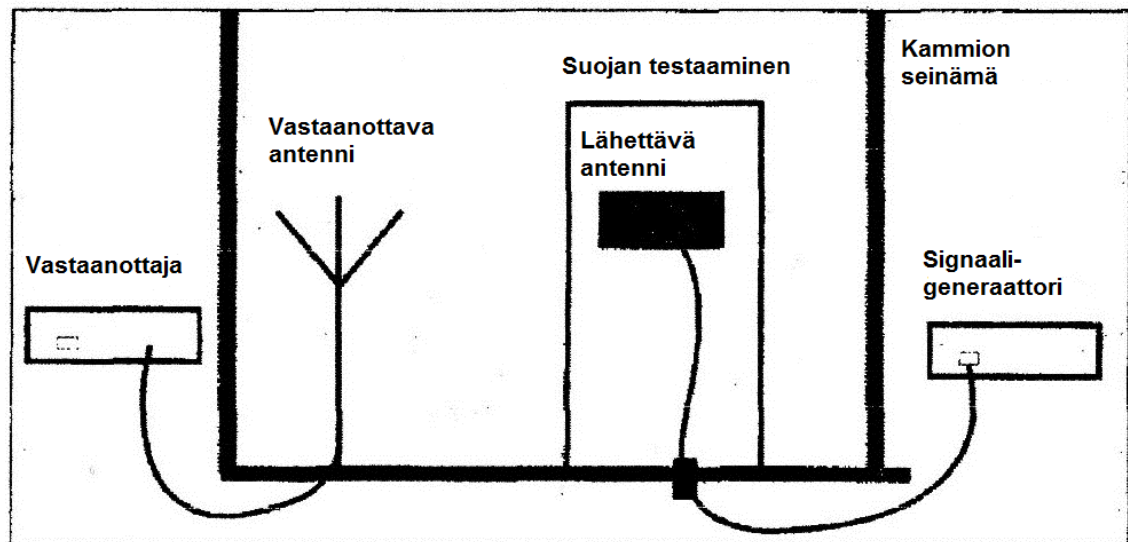
E₁ Sähkökentän voima tarkastelupisteessä ilman suojaa (V/m)

E₂ Sähkökentän voima tarkastelupisteessä suojan kanssa (V/m)

H₁ Magneettikentän voima tarkastelupisteessä ilman suojaa (A/m)

H₂ Magneettikentän voima tarkastelupisteessä suojan kanssa (A/m)

Suojauksen mittaamista vaikeuttaa usein mittalaitteiston ulkopuolelta tuleva sähkömagneettinen säteily. Suojauksen mittaamiseksi tarvitaan suurempi suoja, jonka sisällä mitaukset suoritetaan. Kuvassa 2.8 on havainnollistettu yksinkertaisen suojamittauksen periaate. Kaapeleiden suojaukseen tulee kiinnittää mittaustilanteessa erityistä huomiota. (Wong et al. s. 111)



Kuva 2.8. Suojaustehokkuuden testaaminen. (Wong et al. s. 111)

Pienikokoisten suojien mittaamiseen voidaan käyttää patterikäyttöistä signaalin lähdettä. Patterin käyttäminen mahdollistaa mittauksen ilman voimakaapelien aiheuttamaa häiriötä. Patterien kesto rajoittaa suojauksen testausaikaa. Wong et al. suosittavat käyttämään mittauksissa pyörivää mittausalustaa. Suojan asentoa vaihtamalla pyörivän alustan päällä löydetään helpoiten orientaatio, jossa ulos pääsevän säteilyn määrä on suurin. Suojan tehokkuutta mitattaessa samat toimenpiteet ja mittaukset tulee suorittaa sekä suojan kanssa että ilman suojaa. Vertaamalla häiriön määrää eri taajuuksilla mittaustilanteiden kesken saadaan selville SE-arvo eri taajuuksilla. (Wong et al. s. 110)

3. MATERIAALIT SÄHKÖMAGNEETTISESSA SUOJAUKSESSA

3.1 Metallit

Metalleja käytetään laajalti sähkömagneettisessa suojauksessa. Metalleja käytetään sekä yksinään että seoksissa. Suojauksessa käytetään pääasiassa ferromagneettisia ja korkean johtavuuden omaavia diamagneettisia aineita. Metallisuoja voidaan asettaa paikoilleen usealla eri tavalla. Yksinkertaisimmillaan kyseessä on vain metallilevy lähteen ja suojattavan kohteen välillä. Materiaali voidaan myös pinnoittaa metallilla esimerkiksi sputteroinnilla tai suihkuttamalla. Metalleja käytetään myös suojaverkoissa, joita käytetään esimerkiksi sähköjohtojen yhteydessä. Kankaisiin voidaan sisällyttää metallilankoja, mikäli halutaan valmistaa sähkömagneettiselta säteilyltä suojaavia turvavaatteita. (Neelakanta et al. 1995, s. 453)

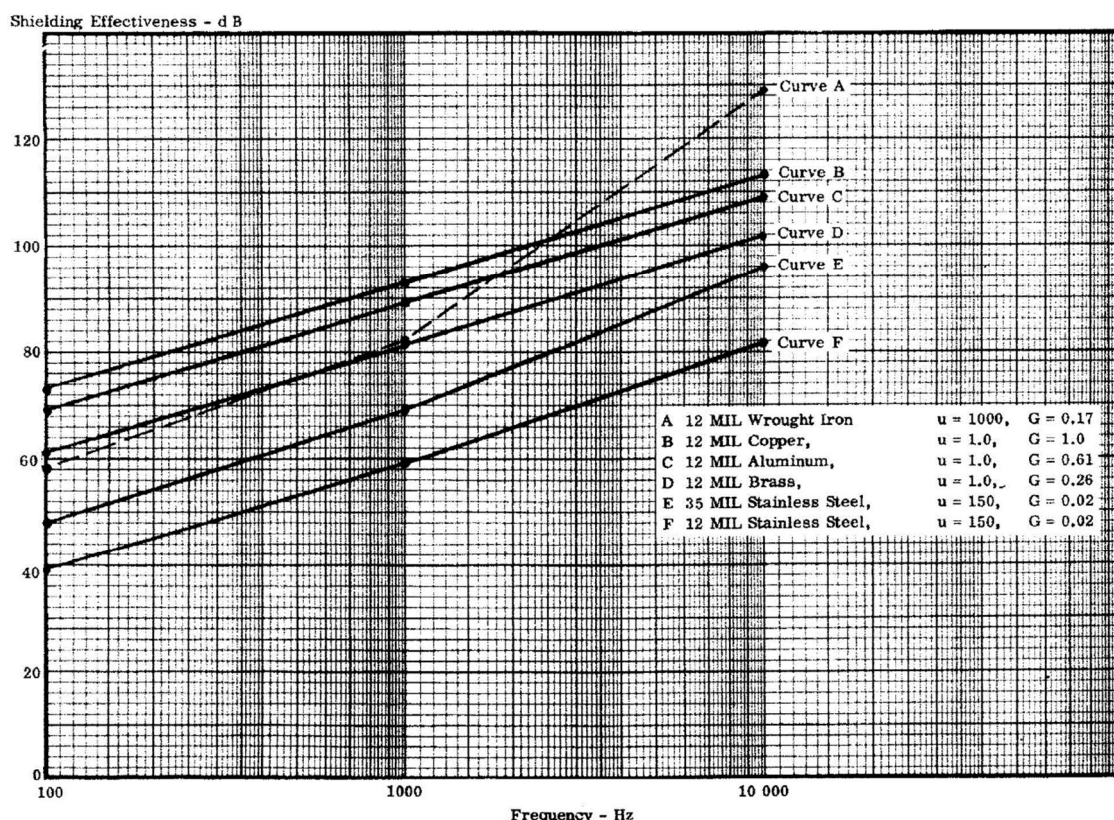
Metalleja voidaan käyttää moniin suojaus sovelluksiin. Suojametalli tulee valita taajuuden mukaan. Kuparia ja alumiinia käytetään kun halutaan suojautua radiotaajuuksilta. Ruostumaton teräs taas estää parhaiten korkeaa, yli 400 MHz säteilyä. Suurien kohteiden, kuten esimerkiksi huoneiden suojaus toteutetaan ohuella metallikalvolla. (Neelakanta et al. 1995, s. 454)

Eräs menetelmä luoda sähkömagneettinen suojakalvo on sinkkivalokaariruiskutus. Metodissa sinkki sulatetaan ruiskun kärjessä ja kuljetetaan ilmapirran avulla suojattavalle pinnalle. Sinkki on hyvin johtavaa ja tarjoaa korkean vaimenemiskertoimen suojalle. Valitettavasti menetelmä on kallis toteuttaa ja aiheuttaa myrkyllisiä kaasuja ympärilleen. Muita ongelmia sinkin käytön suhteen ovat huono kiinnittyvyys, murtumaherkkyys sekä paikallinen korroosio. (Neelakanta et al. 1995, s. 455)

Metalli voidaan levittää pinnan päälle tyhjiössä. Tällä menetelmällä saadaan aikaan tasainen ja hyvin johtava pinta. Metallina voidaan käyttää esimerkiksi alumiinia. Pinnan kestävyys saattaa aiheuttaa ongelmia kulumisen ja korroosion muodossa. (Neelakanta et al. 1995, s. 455)

Sputterointi on menetelmä, jossa kalvo levitetään materiaalin päälle irrottamalla se jännitteen avulla toisesta materiaalista. Menetelmä toteutetaan normaalin ilman sijaan suoja-kaasussa. Sputteroinnilla luotu pinta on tasainen, hyvin johtava ja vahvasti kiinni substraatissa. Laitteiston hinta ja korkeammissa lämpötiloissa tapahtuva pinnan rakoilu rajoittavat sputteroinnin käyttöä. (Neelakanta et al. 1995, s. 454)

Ohuiden metallisuojausten tapauksessa sähkömagneettinen suojaus toteutuu pääasiassa heijastuksen avulla. Babcock tutki yleisimpien metallien käyttämistä sähkömagneettisessa suojauksessa eri taajuuksilla. Babcock huomasi heijastumisen osuuden kasvavan suhteessa absorptioon, kun välimatka sähkömagneettisen häiriön lähteen ja suojattavan kohteen välillä kasvoi. Kuvassa 3.1 on esitetty yleisten metallien SE-arvoja suhteessa taajuuteen. Etäisyydeksi kohteiden välillä Babcock oli valinnut 1000 jaardia eli 914,4 metriä. Vähähiilisen rautaseoksen SE-arvo nousee korkeammassa kulmassa suhteessa muihin materiaaleihin kun taajuus on yli 1000 Hz. Matalammilla taajuuksilla korkein SE-arvo saavutettiin kuparilla ja alumiinilla. (Babcock 1966, s. 45)



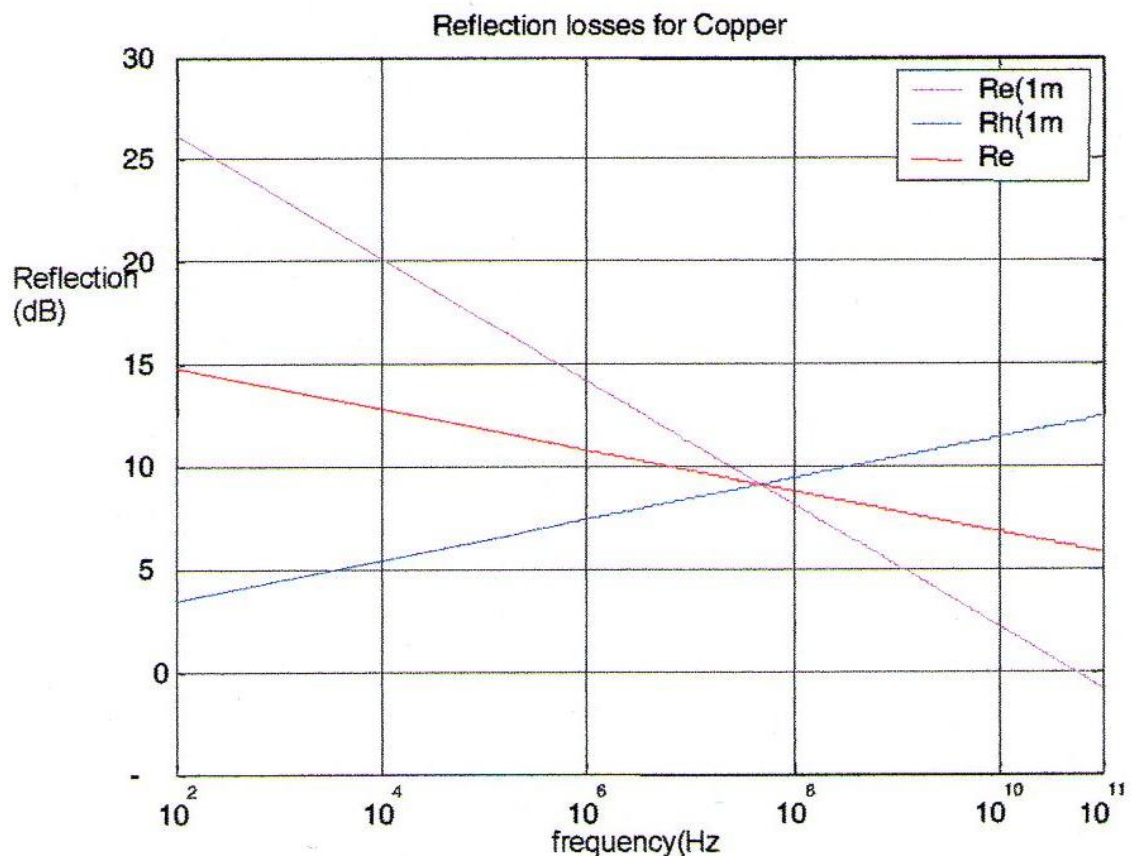
Kuva 3.1. Metallien SE-arvo suhteessa taajuuteen etäisyyden ollessa 914,4m lähteen ja kohteen välillä. (Babcock 1966, s.47)

3.1.1 Kupari

Kupari on yksi käytetyimmistä metalleista elektroniikassa. Kupari johtaa hyvin sähkövirtaa ja lämpöä. Helposti työstettävä kupari on hinnaltaan halpaa verrattuna useimpiin muihin metallisiin vaihtoehtoihin. Metallin pinnalla tapahtuu hapettumista ja korroosioita. Haluttuja ominaisuuksia voidaan vahvistaa yhdistämällä kuparia esimerkiksi grafiitin tai volframin kanssa. Seostamaton kupari on pehmeää, helposti muokattavaa lämpökäsittelyllä. Kupari voidaan päällystää esimerkiksi nikkelillä, mikäli tarvitaan korkeampaa korroosion tai mekaanisen kulutuksen kestoa. (Harper et al. 1994)

Eräs kuparin yleisimpiä seoksia on messinki. Messinki valmistetaan sekoittamalla kupariin sinkkiä. Messinkiä käytetään muun muassa autojen jäähdyttimissä, koruissa, koloissa ja elektronisten laitteiden komponenteissa. Pronssia saadaan aikaan lisäämällä kupariin tinaa, alumiinia, piitä ja nikkeliä. Pronssit ovat mekaanisesti kovempia kuin kupari, ja säilyttävät huomattavan osan kuparin korroosion kestosta. Eräs kuparin vahvimista seoksista saadaan aikaan sekoittamalla kupariin berylliumia. Seos sisältää moniin käyttötarkoituksiin soveltuvat sekä mekaaniset että kemialliset ominaisuudet. Seos on kallista valmistaa, joten sitä käytetään korkeaa laatua vaativissa sovelluksissa, kuten lentokoneiden laskutelineissä sekä lääketieteellisissä laitteissa. (Callister et al. 2000, s. 369)

Kuparin sähkömagneettinen suojaus perustuu pääasiassa heijastukseen taajuuden ollessa matala. Kuvassa 3.2 on esitetty sähkömagneettisen säteilyn heijastuminen kuparin pinnalta yhden metrin etäisyydeltä. Kuvaajista voidaan havaita heijastuksen vaikuttavan sähkökenttään magneettikenttää enemmän. (Oussaid et al. 2008, s. 324)



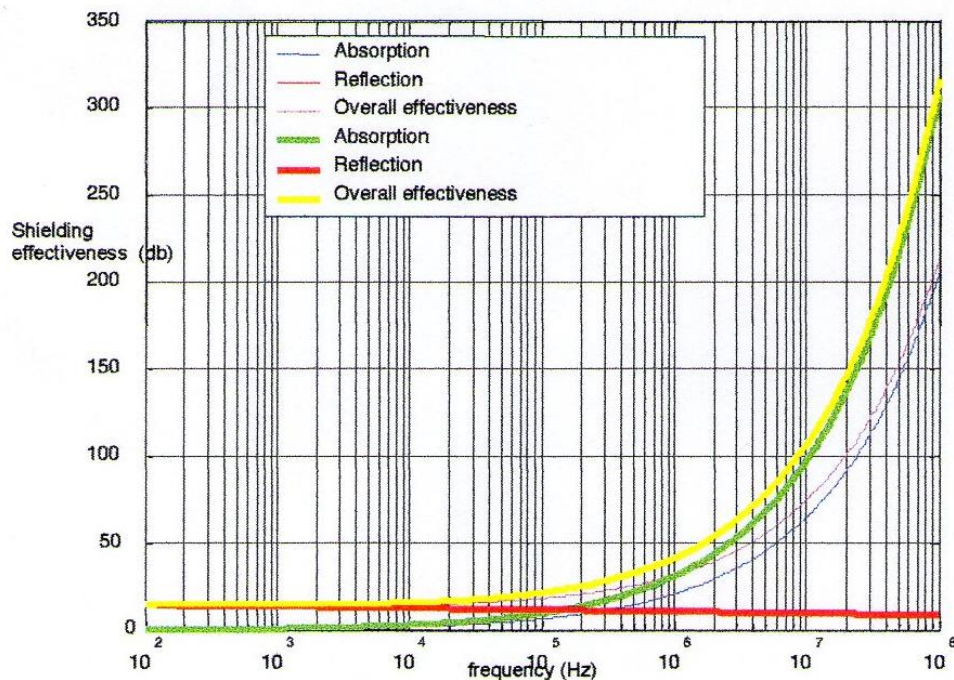
Kuva 3.2. Sähkömagneettisen aallon heijastuminen kuparin pinnalta eri taajuuksilla. Keskimmäinen viiva ilmaisee sähköisen ja magneettisen vaimenemisen yhteisvaikutuksen. (Oussaid et al. 2008, s. 324)

3.1.2 Alumiini

Alumiini on korvannut kuparin monissa eri sähkömagneettikan sovelluksissa. Alumiini on kuparia kevyempää. Materiaalin hinta ja saatavuus ovat lisänneet alumiinin suosiota. Pehmeystään johtuen alumiinia ei voida käyttää useissa sovelluksissa ilman tarvittavaa tukirakennetta. Elektronisten sovellusten liitoksissa alumiinia ei yleensä käytetä, johtuen sen nopeasta hapettumisesta. Näissä sovelluksissa alumiini joudutaan yleisesti päällystämään kuparilla, hopealla tai tinalla. Alumiini ei sovellu käyttötarkoituksiin, missä valokaaren synty on mahdollista. (Harper et al. 1994, s. 524)

Alumiinin mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa kylmämuokkauksella tai tekemällä materiaalista metalliseosta. Muokkaukset altistavat alumiinia korroosiolle. Alumiinia ja sen seoksia käytetään nykyään monissa kulkuvälineissä. Kevyempi tukirakenne vähentää laitteiden polttoaineen kulutusta. Ilmailun alalla alumiinia sekoitetaan nykyään litiumin kanssa. Metallien seos on kevyttä ja kestää hyvin rasitusta matalissa lämpötiloissa. Seoksen valmistaminen on kuitenkin haastavaa johtuen litiumin voimakkaasta kemiallisesta reaktiivisuudesta. (Callister et al. 2000, s. 373)

Kuvassa 3.3 on esitetty sähkömagneettisen aallon vaimeneminen 1 mm paksuisessa alumiinissa. Kuvaajasta havaitaan heijastumisen vaikuttavan enemmän vaimentumiseen matalilla taajuuksilla ja absorptioin vaikutuksen tehostuvan taajuuden noustessa. Paksumman suojakerroksen vaikutus kasvaa taajuuden noustessa. (Oussaid et al. 2008, s. 325)



Kuva 3.3. Alumiinin suojaustehokkuus eri taajuuksilla. (Oussaid et al. 2008, s. 325)

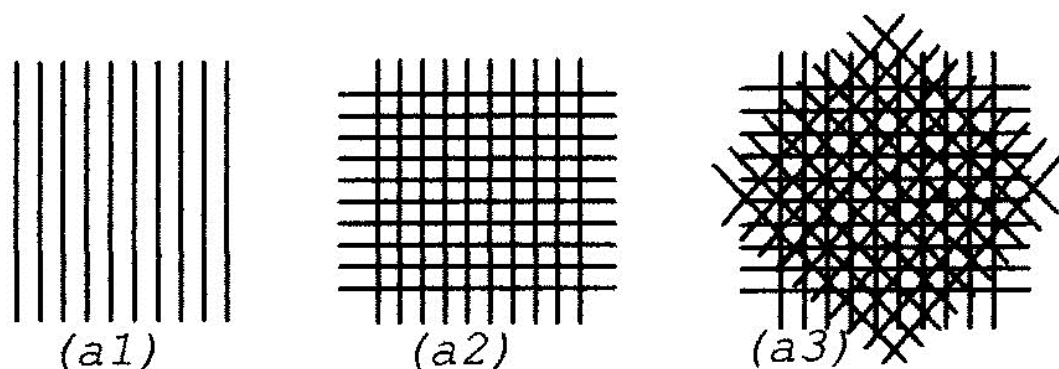
3.1.3 Hopea

Hopeaa käytetään laajalti elektroniikassa. Puhdas hopea johtaa hyvin sähköä, ja sitä käytetään usein sähköisten liitäntöjen yhteydessä. Hopeaa käytetään usein liitoksissa, joissa sähköistä kontaktia ei pureta usein. Hopean mekaanisia ominaisuuksia voidaan parantaa seostamalla sitä muiden metallien kanssa. Seostaminen laskee sähkönjohtavuutta, mutta tekee materiaalista samalla helpommin muokattavaa lämpökäsittelyn avulla. Rikkikaasut vaikuttavat negatiivisesti hopean sähköisiin ominaisuuksiin. Hopeaa seostetaan yleensä kuparin, kadmiumin, platinan, palladiumin tai kullan kanssa. Puhtaan hopean lämmönjohtavuus on huonelämpötilassa korkein kaikista metalleista. (Harper et al. 1994, s. 517)

Hopean pinnalle muodostuu hopeaoksidikalvo materiaalin ollessa kontaktissa ilman kanssa. Kalvo suojaa hopeaa hapettumiselta ja omaa matalan sähkönjohtavuuden. Hopeaoksidikalvo alkaa hitaasti hajoamaan lämpötilan noustessa 176 °C:een. Sähköisissä tasavirtaliitoksissa hopeaa kulkeutuu usein positiiviselta puolelta negatiiviselle puolelle. Liiallinen materiaalin siirtyminen aiheuttaa lopulta katkoksen virtapiirissä. Eroosiota voidaan vähentää lisäämällä virtapiiriin rinnakkaisvastus. (Harper et al. 1994, s. 518)

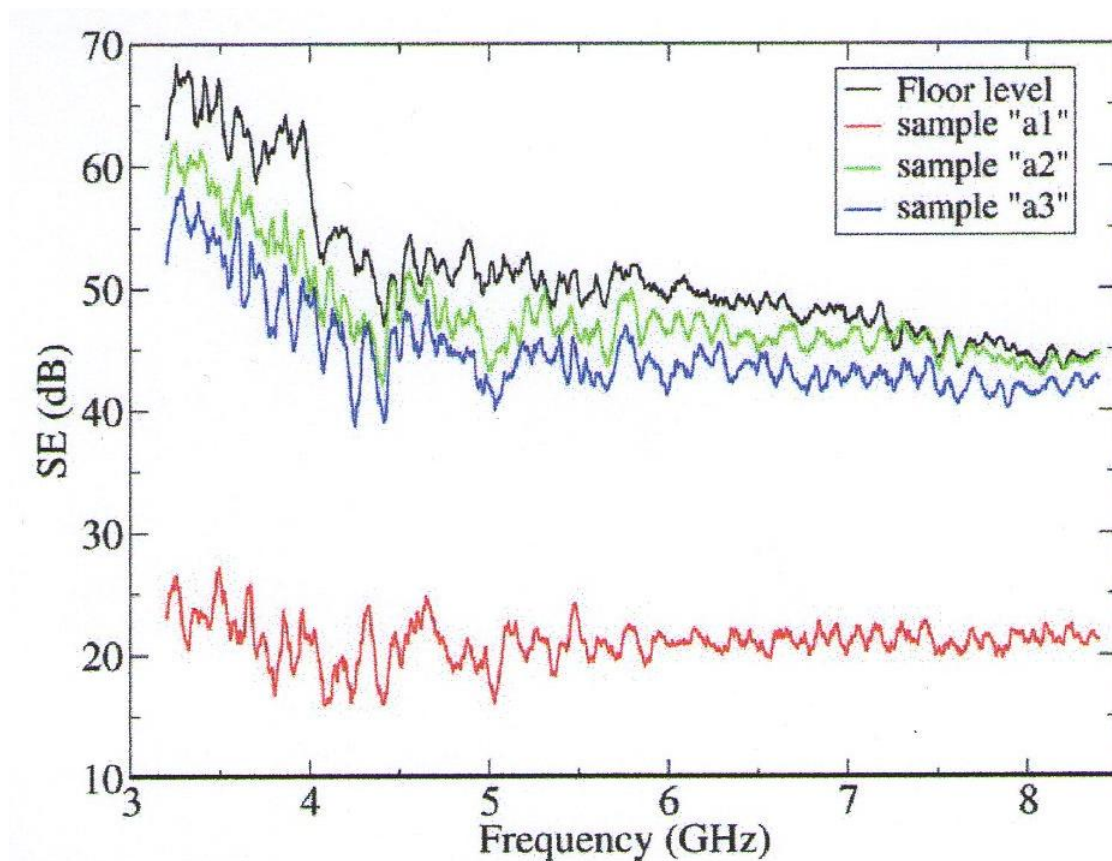
3.2 Hiilikuidut

Hiilikuidut ovat kevyitä ja kestäviä materiaaleja. Hiilikuituja käytetään esimerkiksi ilmailun sovelluksissa. Kuitujen suunta vaikuttaa suuresti aineen mekaanisiin ominaisuuksiin. Micheli et al. selvittivät hiilikuitukomposiittien käyttämistä sähkömagneettisessa suojauksessa. Tutkijat tarkastelivat hiilikuitujen orientaation vaikutusta suojaustehokkuuteen. Hiilikuidut oli sijoitettu epoksiin kolmella eri suuntauksella. Kuvassa 3.4 on esitetty hiilikuitujen asettelu. Kaikissa näytteissä on neljä kerrosta hiilikuituja aseteltuna eri tavoin. (Micheli et al. s. 1)



Kuva 3.4. Hiilikuitujen suunnat epoksissa. (Micheli et al. s. 1)

Kuvassa 3.5 on esitetty eri tavoin aseteltujen hiilikuitujen SE-arvoja taajuuden funktiona. Mittaukset suoritettiin sisäkkäisissä alumiinikammiossa. Tavoilla a2 ja a3 asetettujen hiilikuitujen suojaustehokkuus käyrät muistuttavat suuresti toisiaan. Vierekkäin asetettujen hiilikuitujen suojaus tehokkuus jäi huomattavasti alhaisemmaksi. a1-tyylisten hiilikuitujen tapauksessa suojaustehokkuutta voidaan nostaa asettamalla useita kerroksi hiilikuitua päällekkäin erisuuntaisena. (Micheli et al. s. 3)



Kuva 3.5. Eri tavoin orientoitujen hiilikuitujen SE-arvot taajuuden funktiona. (Micheli et al. s. 3)

3.3 Hiilinanoputket

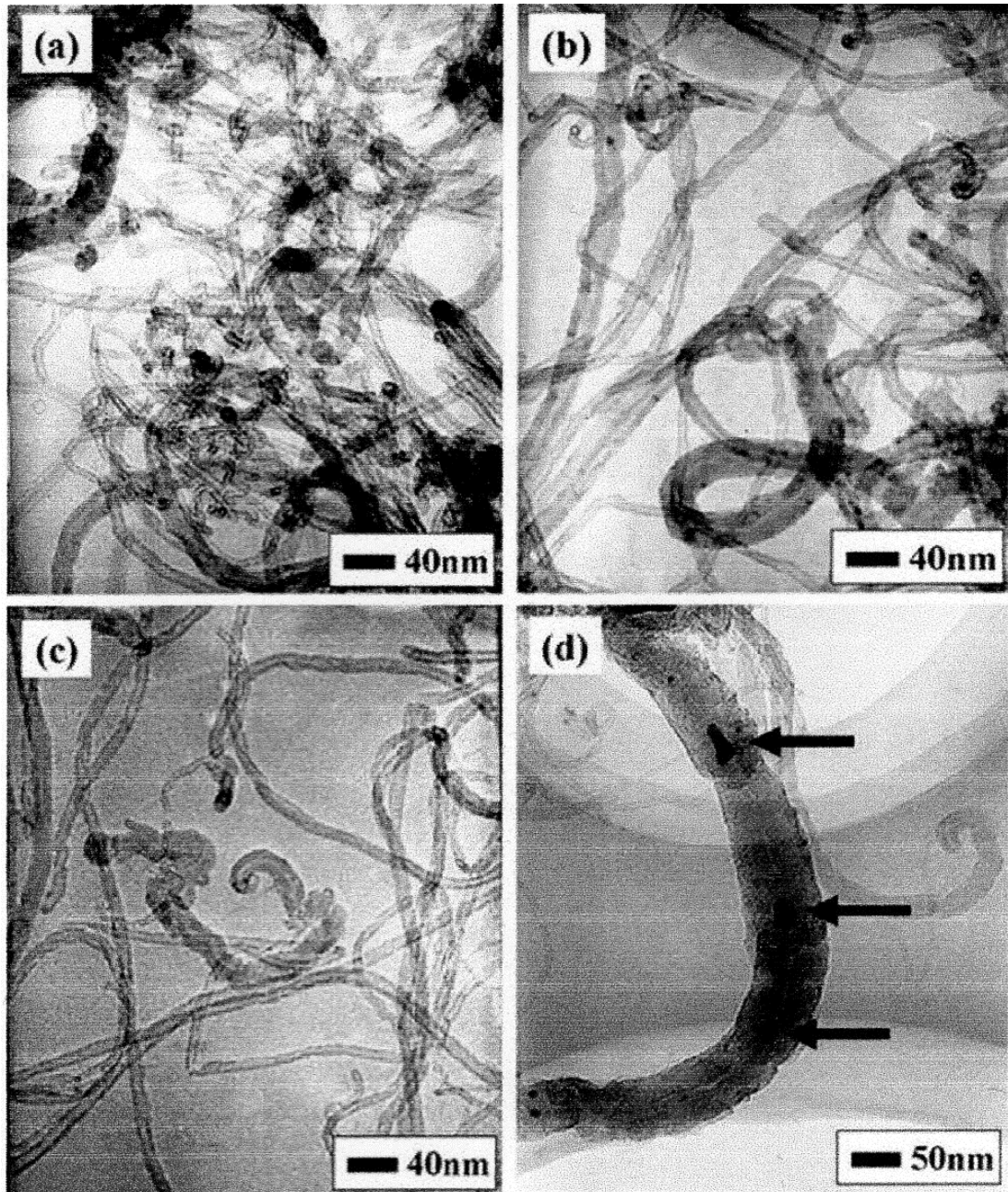
Park et al. tutkivat hiilinanoputkien käyttöä sähkömagneettisessa suojauksessa. Tutkijat olivat sisällyttäneet nanoputkiin reaktiivista etyleeniterpolymeeriä (RET). Park et al. tarkastelivat sekä yksi- että moniseinäisiä nanoputkia. (Park et al. 2010, s. 464–468)

Useat itsestään johtavat polymeerit ovat kalliita, vaikeita valmistaa sekä mekaanisesti heikkoja. Muitakin hiilipohjaisia ratkaisuja kuin nanoputkia on yritetty käyttää sähkömagneettisessa suojauksessa, mutta usein hiilen lisääminen materiaaliin tekee suojasta liian haurasta teollisuuden käyttötarkoituksiin. Hiilinanoputkien avulla johtavuutta voidaan muuttaa suuresti, lisäämällä materiaaliin vain pieni määrä nanoputkia. (Park et al. 2010, s. 464)

Park et al. havaitsivat yksiseinäisten nanoputkien saavuttavan moninkertaisesti useammasta kerroksesta koostuvien nanoputkien suojaustehokkuuden. Taajuuden nostaminen heikensi nanoputkien avulla saatua suojaustehokkuutta niin kauan kuin nanoputkien määrä materiaalissa on alhainen. Park et al. havaitsivat suojaustehokkuuden nousevan taajuuden noustessa kun nanoputkien määrä kokonaismateriaalista oli yli 2.3 %. Tutkijat selittivät ilmiön johtuvan heijastus- ja absorptiomekanismien vastakkaisesta muutoksesta taajuuden kasvaessa. Taajuuden kasvaessa heijastuksesta johtuva SE-arvo laskee ja absorptiosta johtuva SE-arvo kasvaa. Park et al. havaitsivat hiilinanoputkien soveltuvan hyvin keveyttä ja korkeaa SE-arvoa vaativiin sovelluksiin. (Park et al. 2010, s. 468)

Yoon et al. keskittyivät moniseinäisiin hiilinanoputkiin, joista käytetään nimitystä MWNT (multiwalled carbon nanotube). Tutkijat huomasivat, että polyuretaanin muokkaaminen sähkömagneettiseen suojaukseen sopivaksi vaati sekä nanoputkien että hopealiuskeiden lisäämistä suojamateriaaliin. Yoon et al. keskittyivät tarkastelemaan hiilinanoputkissa esiintyvien epäpuhtauksien vaikutusta suojaustehokkuuteen. Tutkijat puhdistivat nanoputkia erinäisten happojen avulla. (Yoon et al. 2005, s. 872)

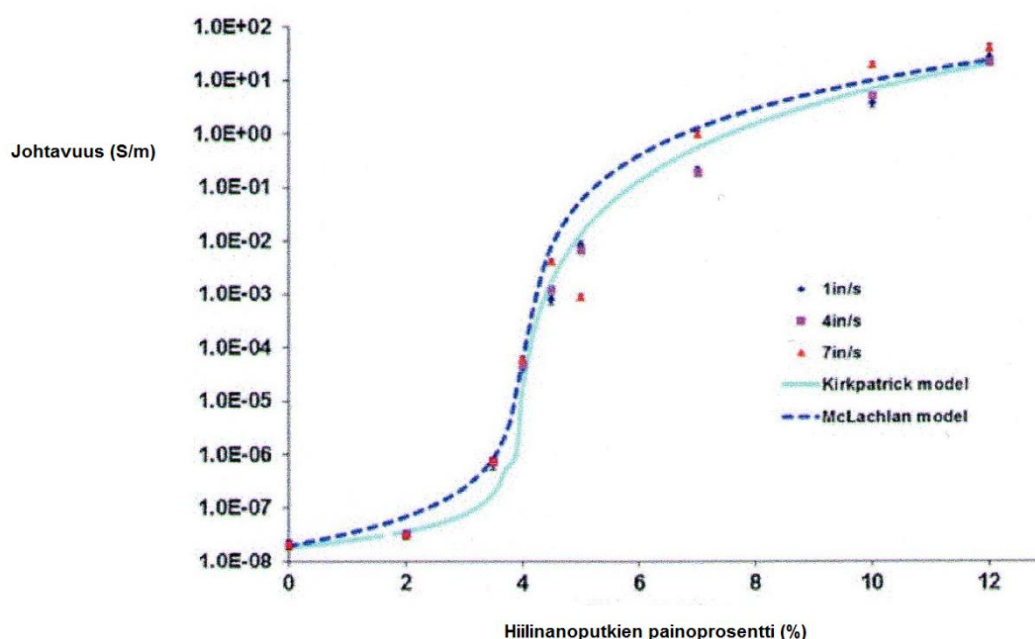
Yoon et al. havaitsivat epäpuhtauksia sisältävien hiilinanoputkien jakautuvan epätasaisesti polyuretaanin sisällä. He selittivät ilmiön johtuvan van der Waals-voimasta, joka aiheuttaa voiman kahden aineessa ilmenevän dipolin välillä. Happokylvyn konsentraatio ja lämpötila vaikuttavat puhdistusprosessiin. Liian suuri konsentraatio happoa vahingoittaa hiilinanoputkien rakennetta. Happo voi murtaa nanoputkien seinämiä. Rakenteen hajoaminen aiheuttaa nanoputkien turpoamista. Nanoputket eivät liian tehokkaan happokylvyn jälkeen ole enää onttoja. Hopearakeet jäävät nanoputkien sisään ansaan, eivätkä vaikuta johtavuuteen. Puhdistus prosessissa on tärkeää löytää sopiva tasapaino epäpuhtauksien ja rakenteen kestävyuden välillä. Kuvassa 3.6 on esitetty suurennos eri olosuhteissa puhdistetuista nanoputkista. Kuvassa d) näkyvien nanoputkien rakenne on hajonnut. Nanoputkien sisään juuttuneet metallipalaset on merkitty mustilla nuolilla. (Yoon et al. 2005, s. 875–878)



Kuva 3.6. Puhdistettujen nanoputkien suurennot. (Yoon et al. 2005, s. 874)

Hiilinanoputkista voidaan valmistaa monia elektroniikan komponentteja kuten diodeja ja transistoreita. Eräs tärkeimmistä ominaisuuksista sähkömagneettisessa suojauksessa on materiaalin johtavuus. Yksiseinäiset (SWCNT) nanoputket mahdollistavat elektroni-
 en liikkeen ilman sirontaa, joka aiheuttaa matalataajuisia kohinaa nanoelektroniikan
 sovelluksissa. Vähäinenkin sironta vaikuttaa suuresti putkien johtavuuteen, koska putki-
 en pinta-ala on suuri suhteessa niiden tilavuuteen. Monikerroksisten putkien tapaukses-
 sa eripituiset kerrokset aiheuttavat sirontaa kerrosten välillä. Nanoputkien pituuksien
 ollessa lyhyitä ja jännitteen ollessa matala virran johtuminen tapahtuu lähinnä ulointa
 metallikerrosta pitkin. Jännitteen noustessa johtumista alkaa tapahtumaan myös moni-
 kerroksisen putken sisemmissä osissa. (Ruuskanen 2014b, s. 97–102)

Hiilinanoputkien aiheuttama johtavuus materiaalissa on riippuvainen nanoputkien määrästä verrattuna eristävän materiaalin määrään. Eristeeseen lisättyjen nanoputkien määrää tarkastellaan usein prosenttiluvulla komposiitin kokonaispainoon verraten. Hiilinanoputkilla aikaansaatu johtavuus nousee selvästi nanoputkien ylittäessä materiaalille ominaisen prosenttiluvun. Kuvassa 3.7 on esitetty johtavuuden ja nanoputkien painon välinen yhteys. Moniseinäisiä käytettäessä johtavuus nousee selvästi nanoputkien massan ylittäessä 3,8 % kun eristävänä materiaalina käytetään polypropyleeniä. (Ngabonziza et al. 2011, s. 289–298)



Kuva 3.7. Hiilinanoputkien aiheuttama johtavuus polypropyleenissä kasvaa nopeasti kun 3,8 % kynnsarvo on ylitetty. (Ngabonziza et al. 2011, s. 293)

Ngabonziza et al. tutkivat nanoputkien lisäämisnopeuden vaikutusta johtavuuteen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Painoprosentin ollessa 4-5 % nanoputkien asettamisella voidaan vaikuttaa johtavuuteen. Määrän ollessa yli 7 % kokonaispainosta johtavuus voidaan saavuttaa jopa sattumanvaraisella nanoputkien levityksellä. Ngabonziza et al. päättelivät nopean levitysnopeuden vaikuttavan nanoputkien orientaatioon komposiitilla. (Ngabonziza et al. 2011, s. 289–298)

Gupta et al. tutkivat PTT:n (polytrimetyyleeni teraftalaatin) ja moniseinäisten hiilinanoputkien käyttöä sähkömagneettisessa suojauksessa. Tutkijat havaitsivat johtamisen kynnsarvon olevan 0,24 % kyseisellä komposiitilla. Heijastumisesta riippuvassa suojaustehokkuudessa ei tapahtunut suuria muutoksia vaikka nanoputkien määrä nostettiin lähelle viittä prosenttia. Absorptiosta johtuvan suojausarvon havaittiin jatkavan nousua hitaasti myös raja-arvon ylittyttyä. Tutkijat päättelivät heijastuksesta johtuvaan

suojausarvon lopettavan nousun pisteessä, jossa komposiitissa on riittävästi nanoputkia johtavan verkoston ylläpitämiseksi. Absorptiosta johtuvan suojauksen tehokkuus oli riippuvainen varauksien liikkeestä materiaalissa. Gupta et al. päättelivät absorption olevan pääasiallinen suojausmenetelmä kyseisessä komposiitissa. (Gupta et al. 2011, s. 6416–6423)

3.4 Sähköä johtavien partikkelien käyttö komposiiteissa

Johtavia polymeerejä voidaan käyttää sähkömagneettisessa suojauksessa. Johtavuus saadaan aikaan lisäämällä polymeeriin johtavia partikkeleita. Polymeerien johtavuus kasvaa lämpötilan noustessa, mikä tekee niistä ideaalisia suoja korkeita taajuuksia sisältäviä sähkömagneettisia aaltoja vastaan. Polymeerit ovat mekaanisesti kestäviä. Sähkömagneettisen suojauksen teho aiheutuu polymeerin partikkelien määrästä, suojakerroksen paksuudesta sekä sähkömagneettisen aallon suunnasta ja taajuudesta. Johtavia polymeerejä voidaan käyttää myös estämään sähkömagneettista häiriötä. Johtavaa lateksipolymeeriä voidaan levittää suojattavien laitteiden koteloiden ympärille. Asettamalla useita eri polymeereistä valmistettuja suoja rinnakkain saadaan aikaan monikerroksinen suoja. Useaa eri polymeeriä sisältäviä suoja käytetään, kun halutaan suojata kohde usealta eri taajuudelta. Polymeerien suojaustehokkuus nousee tasaisesti taajuuden kasvaessa materiaalille tyypilliseen pisteeseen asti. Tämän taajuusarvon ylittyttyä suojaustehokkuus nousee jyrkästi. (Neelakanta et al. 1995, s. 206)

Komposiitilla tarkoitetaan kahden tai useamman materiaalin yhdistelmää, jotka ovat edelleen säilyttäneet oman faasinsa. Niitä ei esiinny luonnossa, vaan ne on rakennettu varta vasten ihmisten toimesta. Komposiitteja voidaan käyttää sähkömagneettisessa suojauksessa usealla eri tavalla. Yhdistämällä useita eri materiaaleja saadaan aikaan ominaisuuksia, joita ei löydy yhdestä yksittäisestä aineesta. Eräs käytetyimmistä komposiiteista on polymeerimatriisiin sisälle sijoitettu hiilikuituverkosto. Kuidut lisäävät polymeerin jäykkyyttä ja kestävyyttä ulkoista painetta vastaan. Komposiitin sähkömagneettisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäämällä materiaaliin johtavia hiukkasia, kuituja tai lastuja. Eräs tapa käyttää komposiitteja suojana on valmistaa komposiitti kerroksista, jotka yhdessä antavat suojan sähkömagneettiselta säteilyltä. Yleisiä matriisivaihtoehtoja komposiiteissa ovat polymeeri, sementti, metalli, hiili ja keramiikka. Matriisivaihtoehtoja metalli tarjoaa sopivimmat sähkömagneettiset ominaisuudet, mikäli komposiittia halutaan käyttää sähkömagneettisena suojana. (Neelakanta et al. 1995, s. 464), (Chung et al. 2003, s. 2–7)

Aineen on täytettävä tarkat vaatimukset, jotta sitä voidaan käyttää johtavina hiukkasina sähkömagneettisessa suojauksessa. Aineen rakenne määrittää voiko sitä käyttää pulverina, kuituina tai lastuina. Johtavan materiaalin tulee vaikuttaa mahdollisimman vähän komposiitin rakenteeseen ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Hiukkasten lämpölaajenemiskerroin ei saa erota suuresti tukiaineen lämpölaajenemiskertoimesta. Korroosiokestä-

vyys, mekaaninen kestävyys ja hinta ovat myös lukuun otettavia ominaisuuksia. (Nee-lakanta et al. 1995, s. 464),

Komposiittien vahvuudet ja heikkoudet riippuvat usein matriisiin sisällytetystä materi-aa-lista. Tukiaine voidaan sisällyttää matriisiin yksi- tai monisuuntaisina kuituina. Kuitujen pituus vaikuttaa suoraan komposiitin kestävyysasteen eri tilanteissa. Liiallinen määrä kuituja hauraassa matriisissa saattaa aiheuttaa komposiittiin murtumia, kun ulkoista painetta lisätään. Joustavien matriisien tapauksessa voidaan käyttää enemmän kuituja materiaalin tukemiseen. (Chung et al. 2003, s. 15)

Komposiitit ovat painoonsa nähden erittäin kestäviä materiaaleja. Ilmailun alalla monia ennen metallista valmistettuja osia on alettu korvata komposiiteista valmistetuilla vastaavilla. Komposiittien etuna on myös hinta ja ympäristöystävällisyys. Lentokoneen metallikuori toimi ennen Faradayn häkkiä ja suojasi monia lentokoneen herkkiä instrumentteja sähkömagneettisilta häiriöiltä. Eräs keino lisätä lentokoneiden sähkömagneettista suojausta on sisällyttää komposiittiin metallinen verkko. Muita keinoja komposiitin päällystämiseen ovat johtavan maalin lisääminen, elektrolyysi päällystys tai tyhjiö metallisointi. (Jalali et al. 2009, s. 1–4)

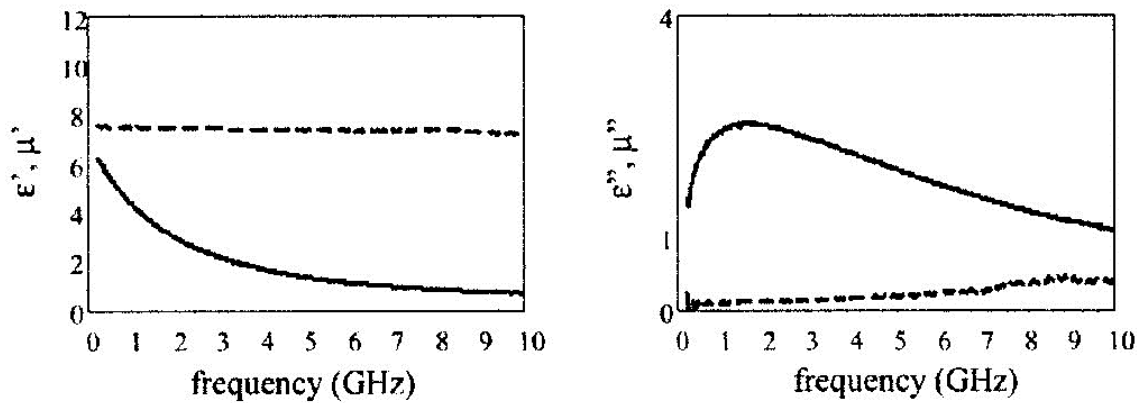
Jalali et al. testasivat menetelmää jossa hiilipohjainen verkko päällystettiin nikkelistä erotetuilla nanopartikkeleilla. Menetelmä perustuu sähkökemialliseen varauksenpurkaukseen. Tutkijat pyrkivät pitämään menetelmän yksinkertaisena ja halpana toistaa, jotta se olisi helposti sovellettavissa nykyisiin käyttökohteisiin. Menetelmässä kaksi nikkeli elektrodi upotetaan elektrolyyttiin. Jännitettä nostettaessa kuplista muodostuu ohut kaasukerros. Jalali et al epäilevät kaasukerroksen estävän materiaalin pääsyn elektrodille. Nanopartikkeleja sisältävä neste kaadettiin päällystettävälle materiaalille ja kuivattiin. Jalali et al. eivät tutkielmaa tehdessään olleet vielä varmoja kaikista menetelmässä tapahtuvista reaktioista, mutta menetelmän havaittiin soveltuvan komposiittien päällystämiseen. (Jalali et al. 2009, s. 1–4)

3.4.1 Finemet

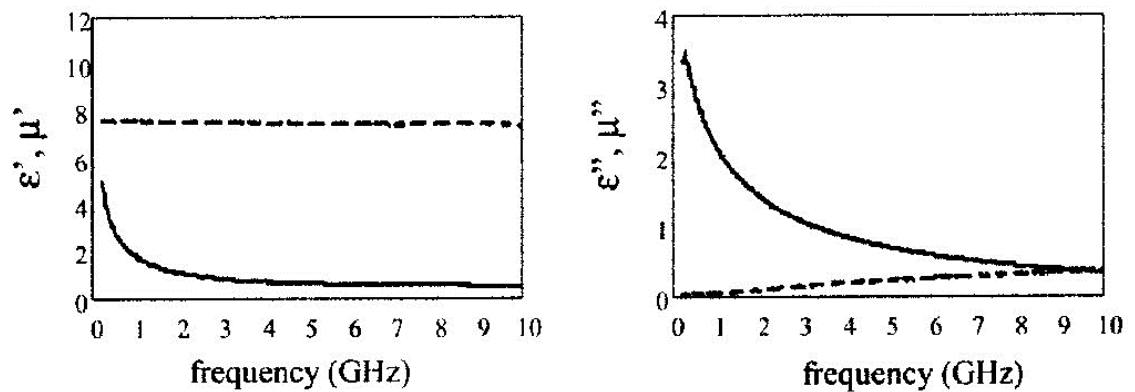
Finemet on kaupallinen nimi Fe-Cu-Nb-Si-B partikkeleita sisältävälle komposiitille. Yoshizawa et al. olivat ensimmäiset, jotka löysivät seoksen magneettiset ominaisuudet. Finemet kuuluu magneettisesti pehmeisiin aineisiin. Finemet estää sähkömagneettisen säteilyn etenemistä pääasiassa absorptiolla. Käyttökohteita sähkömagneettisen suojauksen lisäksi aineella on muun muassa häiveteknologian yhteydessä. Finemetistä valmistettuja linjoja voidaan käyttää komposiitin sisällä. Han et al. käyttivät linjoja FeNi partikkelien yhdistämiseen epoksin sisällä. (Han et al. 2006, s. 515)

Kubacki et al. tutkivat Finemetistä valmistetun pulverin sähkömagneettisen säteilyn absorptiokykyä sekä amorfisessa että kiderakenteisessa muodossa. Eräs absorptiotekniikalla toimivien suojien ongelmista on materiaalien kestävyys suuren voiman mikroaal-

to- pulssien tapauksessa (HPM High Power Mikrowave). Materiaaleja tarvitaan esimerkiksi puolustusvoimien sovelluksissa. Finemet absorboi sähkömagneettisia aaltoja tehokkaasti suurella taajuusvälillä. Kubacki et al. valmistivat Finemet-hiukkasia sisältäviä nauhoja. Sulattamalla ja pyörittämällä valmistettujen nauhojen rakenne oli amorfinen. Lämpökäsittelmällä nauhoja 540 °C tunnin ajan tutkijat saivat muodostettua kiteisen rakenteen. Tutkijat valmistivat amorfista ja kiteistä rakennetta sisältäviä nauhoja useita eri jyväkokoja. Kuvassa 3.8 on esitetty Finemetin reaalinen ja imaginäärinen permittiivisyys sekä permeabiliteetti pienellä alle 25 μm jyväkoolla. Vastaavasti jyväkoon ollessa 100–200 μm muuttuvat kuvaajat kuvan 3.9 mukaisiksi. (Kubacki et al. 2009, s. 97)

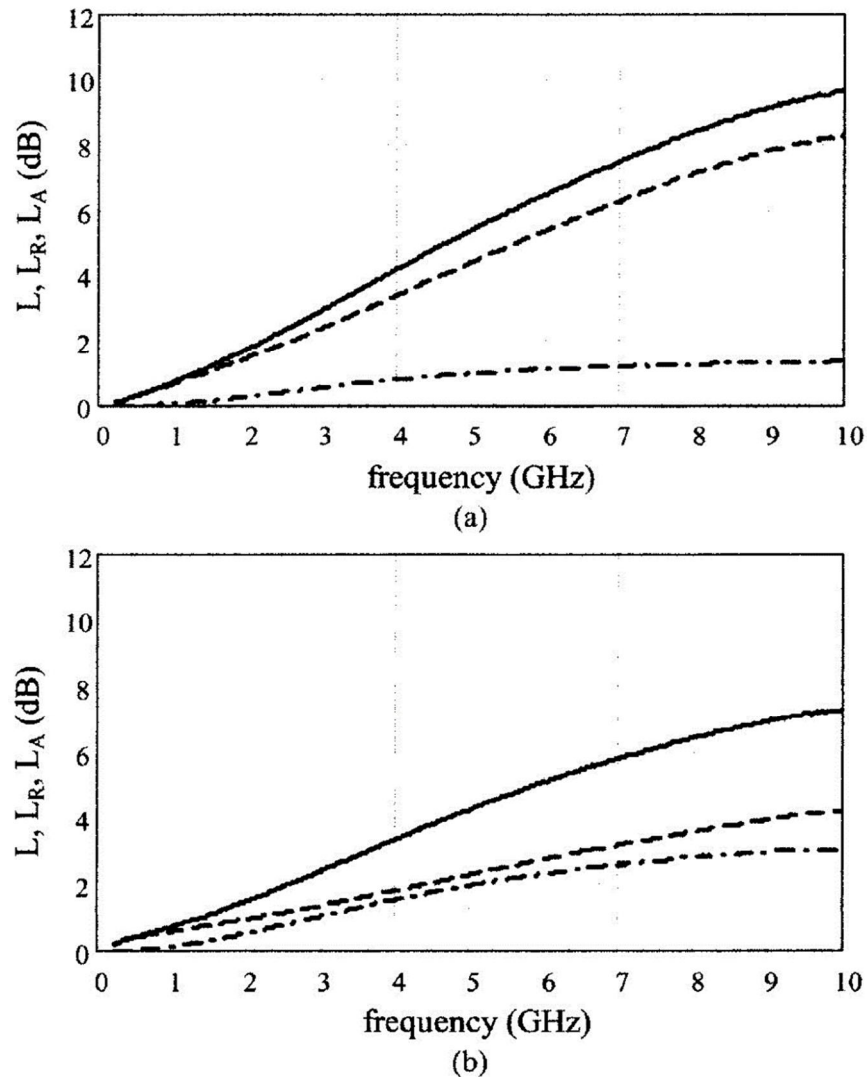


Kuva 3.8. Finemetin permittiivisyys ja permeabiliteetti alle 25 μm jyväkoolla. Kokonainen viiva ilmaisee permeabiliteetin ja katkonainen permittiivisyyden. (Kubacki et al. 2009, s. 97)



Kuva 3.9. Finemetin permittiivisyys ja permeabiliteetti 100–200 μm jyväkoolla. Kokonainen viiva ilmaisee permeabiliteetin ja katkonainen permittiivisyyden. (Kubacki et al. 2009, s. 97)

Tarkasteltaessa imaginääristä permeabiliteettia huomataan, että yksittäinen korkein arvo saavutetaan suurella jyväkoolla. Sähkömagneettisen suojauksen sovelluksissa on usein tärkeää, että suojauksen tehokkuus säilyy myös taajuuden muuttuessa. Pienemmällä jyväkoolla saavutetaan tasaisempi suojaustehokkuus. Kubacki et al. testasivat Finemet kerroksen toimintaa sähkömagneettisessa suojauksessa lisäämällä kalvon taakse metallisen kappaleen. Finemet kalvon paksuus oli testeissä 3 millimetriä. Metallin tehtävänä oli heijastaa Finemet-kalvon läpäissyt säteily takaisin. Kuvassa 3.10 on esitetty säteilyn vaimeneminen taajuuden funktiona jyväkoon vaihtuessa. (Kubacki et al. 2009, s. 97)



Kuva 3.10. Kuvassa a) käytetty jyväkokoa alle $25\mu\text{m}$ ja kuvassa b) $100\text{--}200\mu\text{m}$. Tasainen viiva ilmaisee kokonaisvaimentuman. Katkoviiva ilmaisee absorptiosta syntyvän vaimentuman ja katko-pisteviiva heijastumisesta aiheutuvan vaimenemisen. (Kubacki et al. 2009, s. 98)

Pienillä alle $25\mu\text{m}$ jyväkoolla havaitaan absorption olevan heijastusta huomattavasti tärkeämmässä osassa laskettaessa SE-arvoa. Jyväkoon kasvaessa absorption ja heijastuksen osuus kokonaisvaimenemisessa tasoittuu. Kubacki et al. huomauttavat, että testit suoritettiin pulveriolomuotoiselle Finemetille, jonka käyttöä sovelluksissa tutkijat pitävät haastavana. Erilaiset matriisit Finemetin hiukkasten ympärillä saattavat muuttaa suojaustehokkuutta. (Kubacki et al. 2009, s. 99)

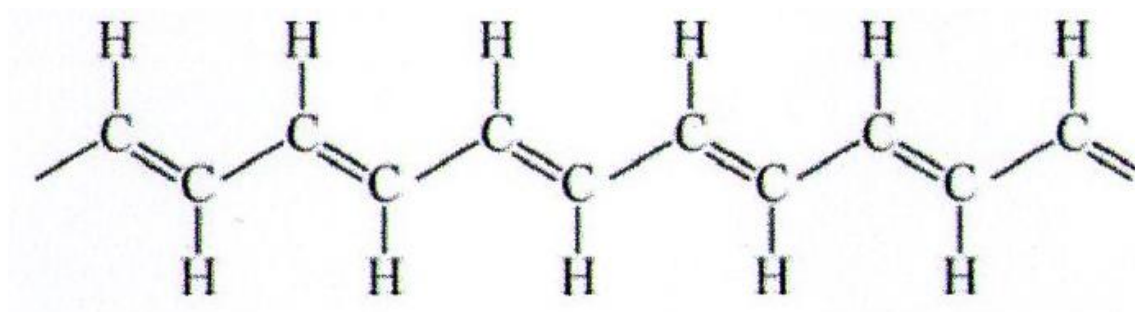
3.5 Itseisjohtavat polymeerit

Polymeerien johtavuus on vain noin neljännes metallien vastaavasta. Olettaessa huomiioon materiaalien paino voidaan polymeerejä pitää jopa metalleja johtavampina. Johtavat polymeerit ovat kevyitä, taipuisia ja helposti valmistettavia. Polymeerejä käytetään uudelleen ladattavissa pattereissa, antistaattisissa vaatteissa, sähkömagneettisissa laitteissa sekä sähkömagneettisessa suojauksessa. (Callister et al. 2000, s. 638)

Eräs tapa saada lisätä polymeerien johtavuutta on douppaus. Douppaus perustuu elektronien lisäämiseen tai poistamiseen materiaalista. Polymeeriä hapetettaessa rakenteesseen syntyy positiivinen varaus, josta käytetään nimitystä aukko. Elektronit pyrkivät täyttämään positiivisen aukon, ja aukon paikka siirtyy läheisten elektronien siirtyessä positiivisen varauksen suuntaan. Varaukset pystyvät siirtymään myös polymeeriketjujen välillä. Kaksoissidos muuttuu yksittäissidokseksi luovuttamalla elektronin. Sidoksen muuttumisesta käytetään nimitystä polarointi. Sähkönjohtavuutta polymeereillä rajoittaa varauksenkuljettajien siirtymään kuluva energia polymeeriketjujen välillä. Douppaus toteutetaan yleensä kemiallisesti tai sähkökemiallisesti. Douppauksessa käytetään yleensä alkalimetalleja ja niiden suoloja, johtuen aineiden korkeasta reaktiivisuudesta. Muita douppauksessa käytettyjä aineita ovat metallikarbonaatit, jodi, fluori ja arsenikki. Douppauksen hapettumisastetta voidaan säätää sähköjännitteellä. Hapettuminen vaikuttaa sähkönjohtavuuden lisäksi usein myös polymeerin muihin ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi jäykkyyteen. P-douppauksessa polymeeriketjuja hapetetaan polykationinen aikaan saamiseksi. Polymeeriin lisätään samalla anioneja, jotka poistavat positiiviset varaukset. N-tyyppisessä douppauksessa polymeeriketju pelkistetään osittain polyanionien syntymistä varten. Materiaaliin lisätään kationeja negatiivisten varausten neutraloimiseksi. (Ruuskanen 2014b, s. 81–84)

Orgaaniset polymeerit muodostuvat σ - ja π -sidoksista. Sigmasidokset ovat kovalenttisia liikkumattomia sidoksia hiiliatomien välillä. Johtavat polymeerit muodostuvat muuttuvista paikallisista π -sidoksista. Hiiliatomit ovat kiinnittyneinä toisiinsa yksin- ja kaksinkertailla sidoksilla. Sidokset voivat olla polymeerissä vuorotellen tai sattumanvaraisesti järjestäytyneinä. Kuvassa 3.11 on esitetty polyasetyleenin molekyyli rakenne. Sähkönjohtavuus perustuu aukkopaikan siirtymiseen polymeeriketjussa. Varaukset kulkevat myös eri polymeeriketjujen välillä. Johtavista polymeereistä käytetään joskus nimitystä synteettinen metalli koska metalleiksi luokitellaan materiaalit, joiden johtavuus on suurempi kuin 10^3 S/cm . Itseisjohtavia polymeerejä ovat muun muassa polypyrolli (PPY),

polyaniliini (PANI) ja polyfenyleenivinyleni (PPV). Johtavat polymeerit muodostuvat hiilisidoksista, joiden välillä liikkuvat elektronit mahdollistavat sähkönjohtavuuden. Johtavista sidoksista muodostuneet polymeerit ovat monessa tapauksessa mekaanisesti liian heikkoja käytettäväksi teollisuudessa. (Wan 2008, s. 1–13)



Kuva 3.11. Polyasetyleeni muodostuu vuorottaisista yksin- ja kaksinkertaisista sidoksista. (Wan 2008, s. 2)

Johtavien polymeerien douppaus eroaa normaalien epäorgaanisten puolijohteiden douppaamisesta. Prosessissa syntyneet vastaionit jäävät johtavien polymeerien tapauksessa osaksi molekyyliketjua. Douppaus voidaan toteuttaa kemiallisen ja sähkökemiallisen menetelmän lisäksi myös valon tai varauksen sisällyttämisen avulla. Näitä menetelmiä käytetään muun muassa aurinkopaneeleissa ja hohtodiodeissa. Polyaniliinin valmistuksessa käytetään protonidouppausta. Douppausasteella voidaan vaikuttaa suuresti polymeerin johtavuuteen. Korkealla noin 50 % douppausasteella saavutetaan suuri määrä varauksenkuljettajia. Johtavien polymeerien varauksen kuljettajat eivät liiku yhtä vapaasti kuin esimerkiksi epäorgaanisten puolijohteiden varauksenkuljettajat, johtuen epätasaisuudesta materiaalirakenteessa. (Wan 2008, s. 1–13)

Li et al. tutkivat douppauksen vaikutusta komposiittien SE-arvoihin. Douppausta suoritettiin erilaisilla oksideilla. Li et al. keskittyivät nostamaan aineen kykyä vaimentaa sähkömagneettista säteilyä. Komposiittina käytettiin $\text{BaCoZnFe}_{16}\text{O}_{27}$ yhdistelmäistä epoksia. Tutkijat pyrkivät minimaaliseen heijastumiseen aineen pinnalla sekä mahdollisimman suureen sähkömagneettisen energian vaimenemiseen materiaalissa. Heijastumisen voimakkuus saadaan laskettua kaavasta 14. Tutkijat testasivat douppausta CuO , MnO_2 , RuO_2 , IrO_2 , V_2O_5 ja $\text{IrO}_2+\text{V}_2\text{O}_5$ oksideilla. Oksidien lisäämisellä materiaaliin voidaan vaikuttaa komposiitin magneettisiin ominaisuuksiin. Oksidijauheen osuus komposiitissa oli 50 %. (Li et al. 2009, s. 670)

$$R \text{ (dB)} = 20 \log_{10} R \quad (14)$$

jossa

$$R = \frac{(Z_{in} - 1)}{(Z_{in} + 1)}$$

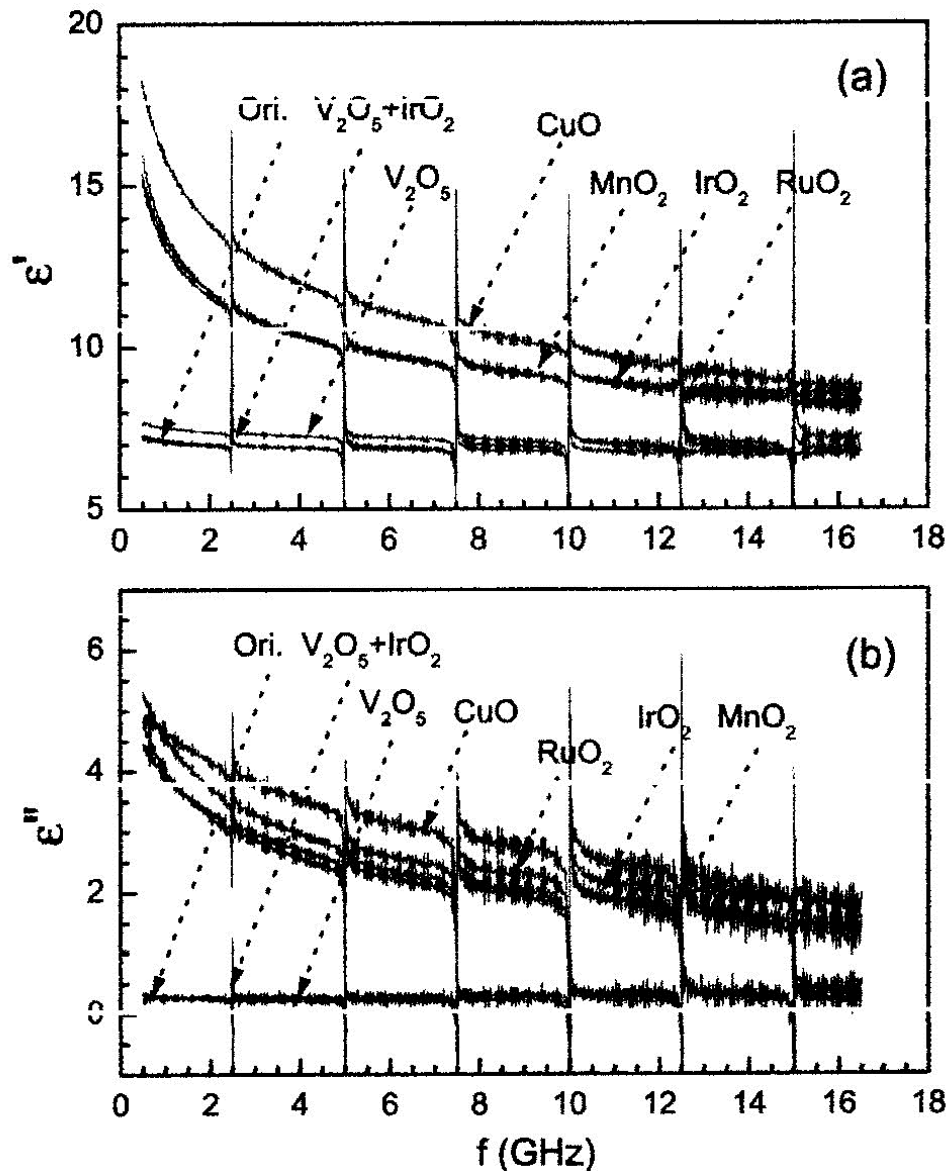
$$Z_{in} = \sqrt{\mu/\varepsilon} \tanh[j(2\pi f t/c)\sqrt{\mu\varepsilon}]$$

c = valonnopeus (m/s)

t = materiaalin paksuus (m)

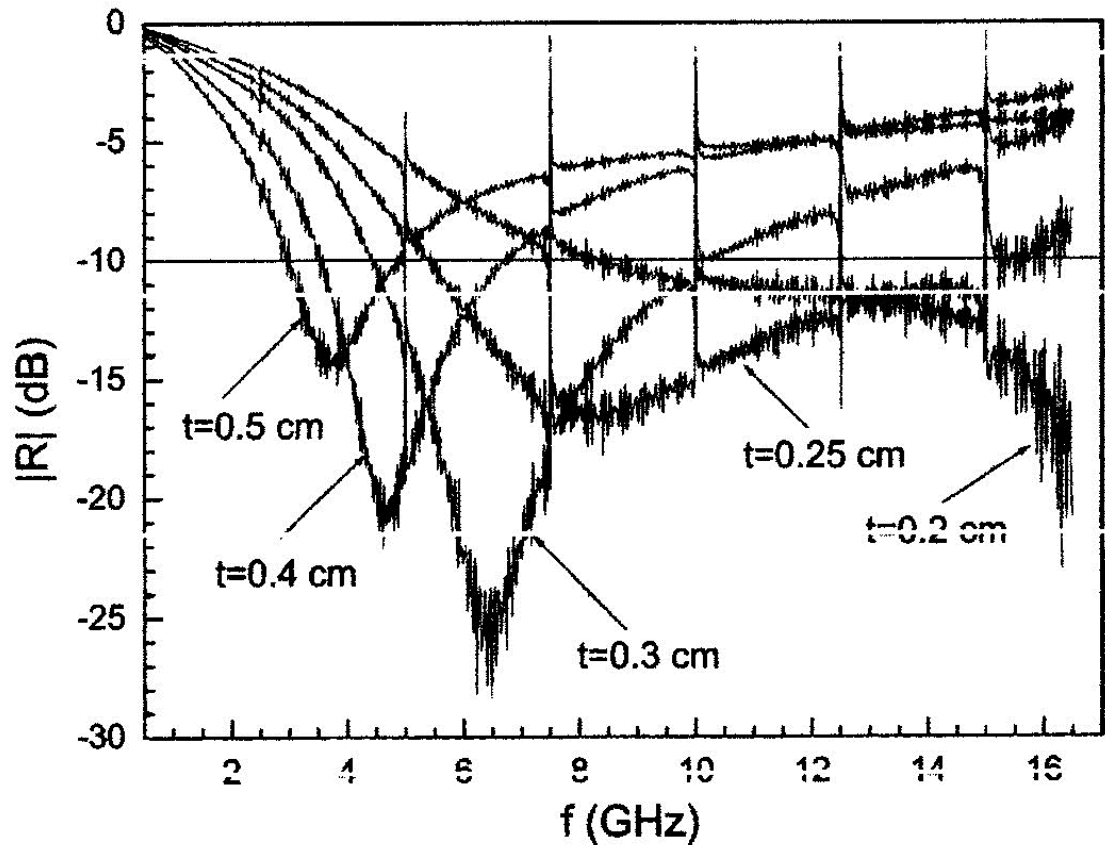
f = taajuus (Hz)

Kompleksisella permittiivisyydellä on suuri vaikutus heijastuksen osuuteen sähkömagneettisessa suojauksessa. Kuvassa 3.12 on esitetty eri oksideilla doupattujen epoksien permittiivisyyksiä.



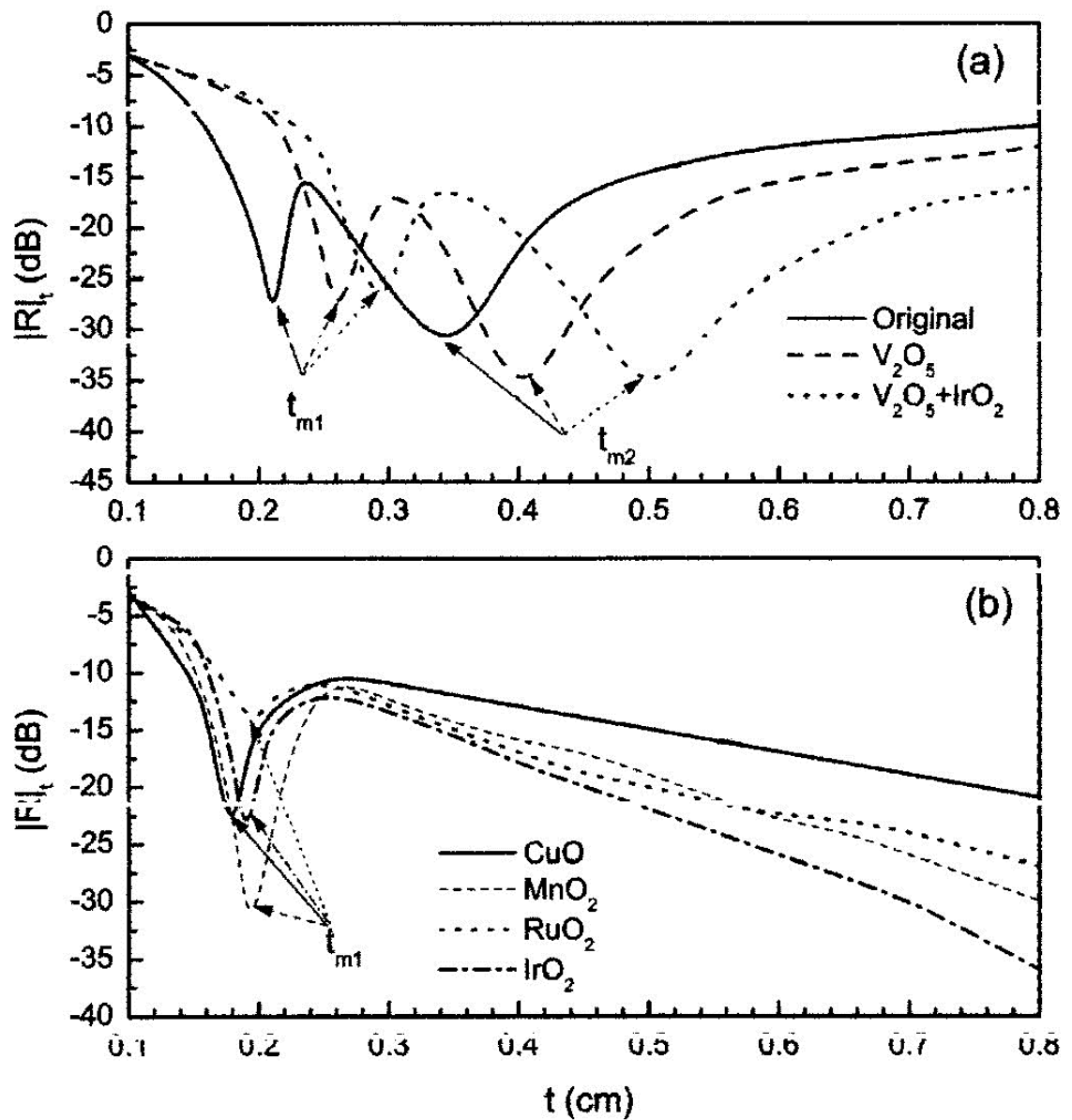
Kuva 3.12. Douppauksen vaikutus reaaliseseen ja imaginaariseen permittiivisyyteen. (Li et al. 2009, s. 672)

Alkuperäinen permittiivisyys sekä V_2O_5 ja $IrO_2+V_2O_5$ oksideilla doupatut komposiitit säilyttivät tasaisen, vähän taajuudesta riippuvan permittiivisyyden. Muiden oksidien kohdalla muutos oli suuri, etenkin matalammilla taajuuksilla. Li et al. pyrkivät mahdollisimman vähäiseen heijastumiseen osuuteen sähkömagneettisessa suojauksessa. Komposiitin paksuus vaikuttaa suuresti heijastumiseen eri taajuuksilla. Kuvassa 3.13 on esitetty heijastuminen alkuperäisessä komposiitissa eri taajuuksilla ja vaihtelevilla paksuuksilla. Kuvasta voidaan havaita 0,3 cm paksun komposiitin antavan matalimman heijastuskäyrän. (Li et al. 2009, s. 673–675)



Kuva 3.13. Komposiitin ihanteellisen paksuuden löytäminen laajalla taajuusvälillä. (Li et al. 2009, s. 673)

Douppaus vaikuttaa käyrän minimikohtien paikkaan taajuuden suhteen. Kuvassa 3.14 on tarkasteltu eri oksideilla doupattujen komposiittien heijastuksen osuutta eri paksuuksilla. CuO , MnO_2 , RuO_2 ja IrO_2 oksidia sisältävät komposiitit antavat matalan heijastusarvon ainoastaan pienellä paksuusvälillä. Alkuperäisellä komposiitilla sekä V_2O_5 tai $\text{V}_2\text{O}_5+\text{IrO}_2$ oksidia sisältävillä käyrillä on kaksi minimikohtaa. Douppaamalla voidaan suuresti vaikuttaa komposiitteihin sähkömagneettisessa suojauksessa. Li et al. havaitsivat douppauksen V_2O_5 tai $\text{V}_2\text{O}_5+\text{IrO}_2$ oksideilla antavan parhaan tuloksen, kun halutaan käyttää komposiittia absorptiomekaniikkaa käyttävänä suojana. (Li et al. 2009, s. 674–677)

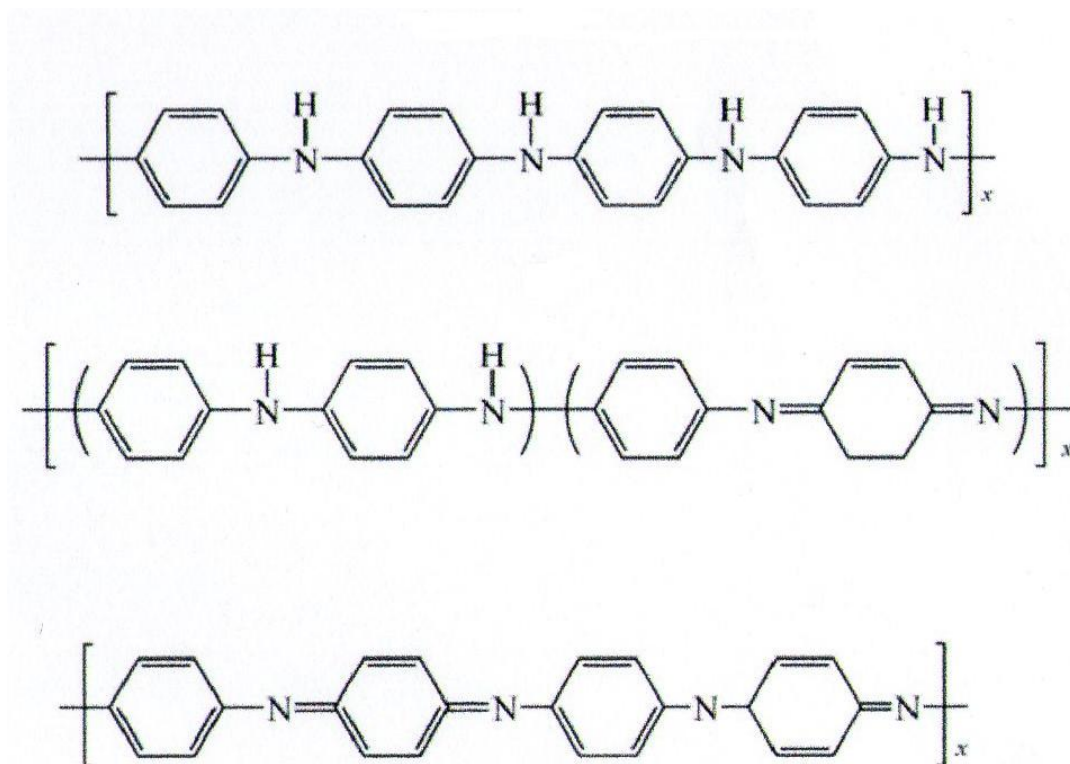


Kuva 3.14. Eri oksideilla doupattujen materiaalien paksuuden vaikutus heijastukseen. (Li et al. 2009, s. 674)

3.5.1 Polyaniliini

Polyaniliini (PANI) on eräs käytetyimmistä itsellään johtavista polymeereistä. Se on molekyyliarakenteeltaan huomattavasti monimutkaisempi kuin monet muut johtavat polymeerit. Kuvassa 3.15 on esitetty polyaniliini hapetettuna eri tavoin. Polyaniliinia valmistetaan protonidouppauksella. Menetelmä toteutetaan esimerkiksi suolahapon avulla. Protonidouppaus ei aiheuta muutoksia polymeerin elektronien sijainneissa. (Wan 2008, s. 16)

Polyaniliinin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa valmistuksen jälkeen douppaamalla. Materiaalia voidaan p-douppata normaalisti, mutta n-douppausta käytettäessä sähköjohtavuus heikkenee nopeasti. Polyaniliinia voidaan valmistaa joko kemiallisesti tai yhdistämällä sähköisiä ja kemiallisia menetelmiä. Polyaniliini on eräs käytetyimmistä johtavista polymeereistä johtuen sen hinnasta, helposta valmistettavuudesta ja korkeasta johtavuudesta. (Wan 2008, s. 20)



Kuva 3.15. Polyaniliin eri hapetusasteet. (Wan 2008, s. 17)

Eräs sähkömagneettisessa suojauksessa käytetty komposiitti on polyaniliinin ja polyuretaanin (PU) yhdistelmä. Hoang et al. tarkastelivat kyseisistä aineista koostuvan monikerrossuojan toimintaa. Polyaniliinia käytetään esimerkiksi sensoreissa, optisissa laitteissa, piirilevyissä ja sähkömagneettisessa suojauksessa. Sen kestävyys ja sähköiset ominaisuudet ovat lisänneet materiaalin suosiota teollisuudessa. Polyuretaani itsessään on eriste, mutta lisäämällä ohut kerros polyaniliinia eristävään matriisiin saadaan aikaan johtava verkosto. Ilmiö johtuu alhaisesta perkolaatio raja-arvosta. Perkolaatiolla ilmaistaan eri materiaalien yhdistymistä. Hoang et al. testasivat polyaniliinia myös monikerros-kalvojen tapauksessa. Kahta polyaniliini kerrosta eristi johtamattomasta materiaalista valmistettu kalvo. Hoang et al. havaitsivat eristävästä materiaalista valmistetun kalvon suuren vaikutuksen materiaalin mekaanisiin, sekä sähkömagneettisiin ominaisuuksiin. Monikerroksinen polyaniliinikalvo ylitti 40dB SE-arvon, joten sitä voidaan Federal Communications Commissionin mukaan käyttää materiaalina sähkömagneettisessa suojauksessa. (Hoang et al. 2006, s. 482)

Sama tutkijaryhmä on tehnyt useamman tutkielman polyaniliinin ja polyuretaanin yhdistelmästä. Toisessa tutkielmassa Wojkiewicz et al. pyrkivät saavuttamaan sähkömagneettisen suojan käyttämällä mahdollisimman vähän polyaniliinia suojan johtavissa kerroksissa. Materiaalin sähkönjohtavuutta voidaan muokata tarkasti muuttamalla polyaniliinin ja polyuretaanin suhdetta. Tässä tutkielmassa kahta polyuretaanista ja polyaniliinista valmistettua kalvoa erotti paksumpi kerros polyimidiä. Wojkiewicz et al. pyrkivät valmistamaan halvan, kestävä ja helposti valmistettavan suojamateriaalin. Laskemalla polyaniliinin määrää suojassa he saivat ulompien kalvojen mekaaniset ominaisuudet vastaamaan polyuretaania. Tutkijat havaitsivat selvän yhteyden johtavuuden ja suojaustehokkuuden välillä. Tämän jälkeen suojaustehokkuutta voitiin tarkastella myös johtavuuskäyrän avulla. Kalvojen joustavuus riippuu eristävästä polyimidikerroksesta. Tässä tutkielmassa käytettiin kaupallisella nimellä Kapton valmistettua polyimidiä. Kalvoyhdistelmän sähkömagneettiset ominaisuudet muuttuvat vain muutaman prosentin monen vuoden aikana, mikä kertoo suojamateriaalin kestävydestä. Verrattuna hiilikuituja tai metallipartikkeleja sisältäviin suojiin polyaniliinisuojaus tarjoaa kevyen ja ulkoisilta ominaisuuksiltaan joustavan vaihtoehdon. (Wojkiewicz et al. 2005, s. 58)

Al-Shabib et al. tutkivat johtavien polymeerien käyttöä sähkömagneettisessa suojauksessa. He keskittyivät langattomien verkkojen aiheuttamien häiriöiden estämiseen. Heidän tarkastelemassaan mallissa polyaniliinisuoja oli kiinnitetty lasiin, joka erotti signaalia lähettävän ja vastaanottavan antennin. Saavutettu signaalihäviö oli -30dB kahden ja kolmen gigahertsin välisellä alueella. Käyttämällä polyaniliinia suojauksessa vältetään korrosio ongelmilta, joita usean metallisuojan kanssa esiintyy. Polyaniliini soveltuu keveydestään johtuen esimerkiksi matkapuhelimiin ja Wi-Fi-laitteisiin. (Al-Shabib et al. 2013, s. 836)

4. KÄYTTÖKOHTEET

4.1 Digitaalisten laitteiden suunnittelu

Sähkömagneettinen yhteensopivuus on tärkeä osa uusien elektronisten tuotteiden suunnittelua. Laitteiden suojaaminen sähkömagneettiselta säteilyltä valmistamisen jälkeen on kallista ja usein vaikeasti toteutettavissa. Komponenttien toiminnalliset rajoitukset määräävät usein käytetyn taajuuden sekä jännitteen. Sähkömagneettisen suojauksen näkökulmasta laitteesta pohjapiirroksesta kannattaa tehdä mahdollisimman tiivis, sillä pitkät vedot komponenttien välissä toimivat antennina, jotka lähettävät ja vastaanottavat häiriösignaaleja. Digitaaliset piirit aiheuttavat yleisesti enemmän sähkömagneettista häiriötä kuin analogiset vastineet. Digitaalisten järjestelmien häiriöherkkyys on vastaavasti pienempi kuin analogisissa järjestelmissä. (Storey et al. 2006, s. 339)

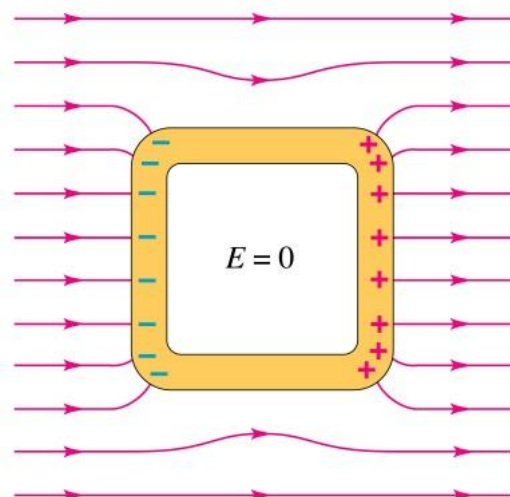
4.1.1 Digitaalisten laitteiden suojaus

Digitaalisten laitteiden herkkyys sähkömagneettiselle säteilylle tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Pitkät linjat ja kaapelit aiheuttavat paljon ongelmia sähkömagneettisen suojauksen suhteen. Logiikkapiirien etäisyys toisistaan tulee olla vain muutamia senttimetrejä, jotta linjat voidaan pitää lyhyinä. Nopeasti vaihtelevat korkean taajuuden signaalit tuottavat eniten häiriötä. Näitä ovat esimerkiksi kellotaajuuslinjat. Häiriötä voidaan vähentää sijoittamalla maalinja kellotaajuuslinjan ja signaalilinjojen väliin. (Storey et al. 2006, s. 513)

Hyvin suunnitellulla piirikaaviolla on suuri merkitys sähkömagneettisen yhteensopivuuden aikaan saamiseksi. Eräs eniten häiriötä tuottavista asioista piirilevyissä ovat jännite-linjat. Häiriötä voidaan vähentää sijoittamalla jännitelinjat piirilevyn eripuolille toistensa päälle. Samaa suunnitteluratkaisua voidaan käyttää monikerrospiirilevyissä. Piirin päälle kiinnitettävät SMT (Surface Mount Technology) komponentit mahdollistavat komponenttien sijoittelun lähemmäs toisiaan. Lyhemmät linjavedot vaikuttavat suoraan sähkömagneettisten häiriöiden vähenemiseen. Levyn läpi sijoitettavat kaksiriviset komponentit (Dual in-line Component) aiheuttavat kokoonsa nähden huomattavasti häiriötä. Näiden komponenttien voimaliitännät sijaitsevat vastakkaisissa kulmissa, joten linjavedoista tulee vastaavasti pidemmät. (Storey et al. 2006, s. 340)

4.1.2 Faradayn häkki

Faradayn häkki eräs yksinkertaisimmista keinoista suojautua sähkömagneettiselta säteilyltä. Suoja on saanut nimensä keksijänsä Michael Faradayn mukaan. Faradayn häkki on usein verkkomainen, johtavasta materiaalista valmistettu suljettu tila. Faradayn häkin toiminta sähkökentässä on esitetty kuvassa 4.1. (Young et al. 2004, s. 857)



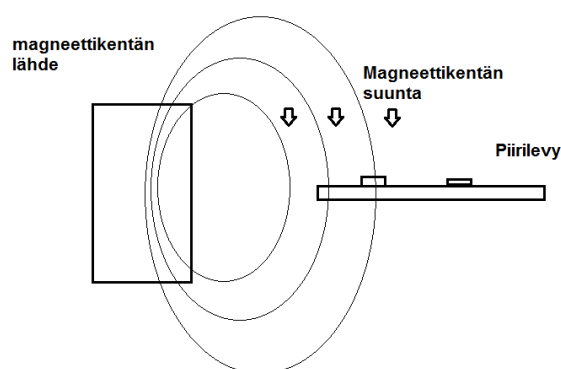
Kuva 4.1. Faradayn häkki ja varausten sijoittuminen sähkökentän mukaisesti. (Young et al. 2004, s. 858.)

Faradayn häkki erottaa sisälleen ja ulkopuolelle jäävät sähkömagneettiset kentät. Faradayn häkin toiminta johtuu varauksien asettumisesta johtavalle pinnalle. Varauksien sijainti on riippuvainen ulkoisen sähkökentän suunnasta, kun tarkastellaan ulkopinnalle jäävien varauksien sijaintia. Positiiviset varaukset asettuvat sähkökentän kulkusuunnan mukaiselle puolelle. Gaussin lain mukaan johtavan pinnan sisälle jäävän sähkökentän arvo on nolla (kaava 2). (Young et al. 2004, s. 858)

Faradayn häkki aiheuttaa myös muutoksen lähellä sijaitsevan sähkökentän kulussa. Verkon aukkojen koko verrattuna säteilyn aallonpituuteen on tärkeässä osassa käytettäessä Faradayn häkkiä. Metallikuori tarjoaa magneettikentän vuolle uuden reitin, ympäri suojatun kohteen. Mikroaaltouunit, hissit ja autot ovat jokapäiväisiä sovelluksia, joissa Faradayn häkin vaikutus voi tulla vastaan. (Young et al. 2004, s. 858)

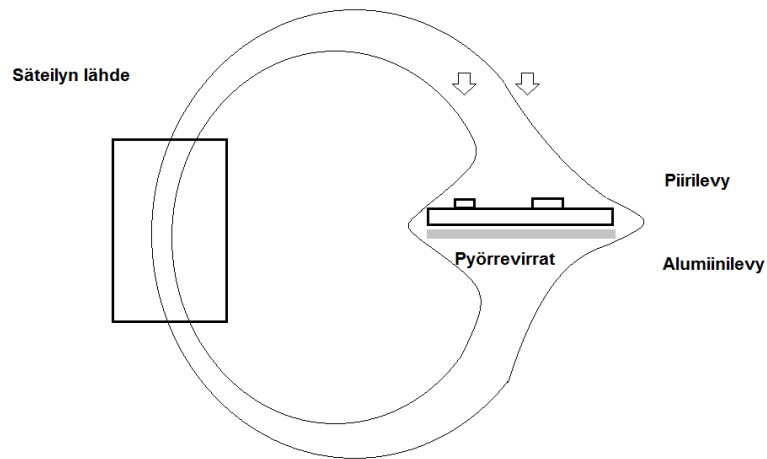
4.1.3 Pyörrevirrat

Pyörrevirroilla tarkoitetaan muuttuvan magneettikentän vaikutuksesta syntyneitä ympyrän muotoisia virtasilmukoita. Nämä virrat aiheuttavat oman magneettisen vuonsa, joka vastustaa ulkoisia magneettikenttiä. Pyörrevirtoja voidaan käyttää hyödyksi suojaattaessa laitteita magneettiselta vuolta. Pyörrevirtojen avulla ulkoisen magneettikentän vuo voidaan ohjata pois päin suojaattavasta kohteesta. Yksinkertainen suojaus saadaan aikaan lisäämällä alumiinista valmistettu levy suojaattavan esineen pohjalle. Kuvassa 4.2 on esitetty piirilevy magneettikentässä ilman pyörrevirtoja aiheuttavaa alumiinilevyä. (Shielding Theory 2015, s. 3)



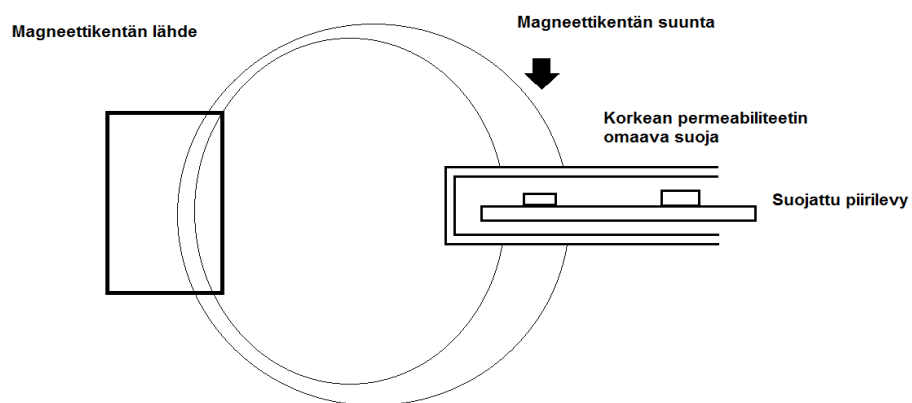
Kuva 4.2. Piirilevy magneettikentässä ilman alumiinilevyä.

Magneettikentän suuntaan vaikuttamiseen tarvitaan pysyviä pyörrevirtoja. Kuvassa 4.3 tarkastellaan samaa tilannetta kuin ylemmässä kuvassa, mutta tällä kertaa piirilevyn alle on sijoitettu alumiinilevy. Pyörrevirtojen avulla ei voida estää staattisia, ajan suhteen muuttumattomia magneettikenttiä. Tästä johtuen pyörrevirtojen teho heikkenee matalilla taajuuksilla. Levyn tulee olla tasainen ja ilman aukkoja pyörrevirtojen muodostumista ja käyttöä varten. (Shielding Theory 2015, s. 4)



Kuva 4.3. Pyörrevirrat ohjaavat magneettikentän vuon piirilevyn ohi.

Magneettinen suojaus voidaan myös toteuttaa korkean permeabiliteetin materiaaleilla. Suoja tarjoaa magneettikentän linjoille vaihtoehdoisen reitin suojattavan kappaleen ympäri. Suoja voidaan valmistaa esimerkiksi teräksestä tai mu-metallista. Magneettisilla materiaaleilla toteutettu suojaus on esitetty kuvassa 4.4. Menetelmää voidaan käyttää myös matalilla taajuuksilla. Toisin kuin pyörrevirtoja käyttävässä suojausmenetelmässä, tulee magneettisen materiaalin ympäröidä suojattava kohde kokonaisuudessaan. (Shielding Theory 2015, s. 4)



Kuva 4.4. Korkean permeabiliteetin omaavien materiaalien käyttö suojauksessa

4.1.4 Kaapeleiden suojaus

Pitkät kaapelit ovat usein välttämätön osa elektronisia laitteita. Valitettavasti ne aiheuttavat myös ongelmia sähkömagneettisessa suojauksessa. Heikosti suojatut kaapelit saattavat estää muuten sähkömagneettiselta säteilyltä suojatun laitteen toiminnan (Storey et al. 2006, s. 344). Datan turvallisuus on myös yksi syy suojata kaapeleita. Tiedon kaappaamiseen suunnitelluilla laitteilla pystyy tallentamaan säteilynä leviävän häiriön ja muuttamaan sen uudelleen luettavaksi. Williams on antanut tällaisesta tilanteesta esimerkiksi mallin jossa datan kulku tietokoneesta näyttöön on huonosti suojattu, ja on luettavissa suojatun alueen ulkopuolella. Sotilaalliset suojaukset on nykyään otettu paremmin huomioon, mutta kaupallisella puolella tilanteesta ollaan vielä vähemmän tietoisia. (Williams et al. 2001, s. 20.)

Yksinkertaisin suojaustapa on päällystää kaapeli suojaavalla materiaalilla. Toimintaperiaate on sama kuin Faradayn häkillä. Faradayn häkillä tarkoitetaan johtavasta materiaalista valmistettua häkkiä, joka suojaa sähkömagneettiselta säteilyltä. Koaksiaalikaapelissa on johtava sisin kerros, jota ympäröi eristävä dielektrisestä materiaalista valmistettu suoja. Eristettä ympäröi kuparista valmistettu palmikoitu johtava kerros. Uloin kerros on muovista valmistettu eristävä suoja. Eräs käytetyimmistä kaapeleista on parikaapeli. Toistensa ympäri kierretyt johdinlinjat vähentävät tehokkaasti häiriöitä. Tehokkain tapa suojata kaapelit sähkömagneettiselta säteilyltä on yhdistää eri suojauskeinoja. Suojakerroksella ympäröidyn parikaapelin aiheuttamat ja vastaanotetut häiriöt ovat yli miljoona kertaa pienemmät kuin yksinkertaisen suojaamattoman kaapelin. Eräs kaapelien vaikeinten suojattava kohta on liitäntä laitteeseen. Häiriövapaan tuloksen aikaansaamiseksi myös liitäntä tulisi olla suojattu sähkömagneettiselta säteilyltä. (Storey et al. 2006, s. 344)

4.1.5 Piirien osiointi ja maadoitus

Elektroniset järjestelmät tarvitsevat toimiakseen sekä jännite- että maalinjan. Yksinkertaisimmillaan laitteessa on yksi maadoitettu linja, johon laitteen eri osiot on yhdistetty. Yksinkertaisilla suunnitteluratkaisuilla on suuri merkitys laitteen sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen. (Storey et al. 2006, s. 341)

Halvin ratkaisu on kiinnittää laitteen eri moduulien maalinjat aina edellisen moduulin maalinjaan. Tällä tavalla kytketyn laitteen maalinjoista ainoastaan ensimmäinen on suoraan yhteydessä maahan. Ratkaisu on linjojen vedon kannalta yksinkertainen, mutta muutokset yhden moduulin virrassa aiheuttavat variaatiota muiden moduulien maapotentiaaleissa. (Storey et al. 2006, s. 342)

Jokaisella osiolla voi olla myös oma maalinja. Jokaisen osion liittämistä erikseen maa-linjaan käytetään nimitystä tähtikytkentä. Yhdestä pisteestä toisiinsa liitettäviä moduuleita käytetään, kun niiden oletetaan aiheuttavan häiriötä toisilleen. Eräs tapa osioida laite on asettaa analogiset ja digitaaliset piirit omiin moduuleihinsa. Näiden lisäksi myös paljon häiriötä aiheuttavat komponentit voidaan sijoittaa oman maalinjan taakse. (Storey et al. 2006, s. 342)

Mikäli laitteen osiossa on enemmän kuin yksi maalinja, muodostuu siihen maasilmutka. Silmutkat aiheuttavat häiriötä ympäristöönsä. Silmutkoita voi syntyä myös parasiittisen kapasitanssin vaikutuksesta ilman kokonaista maasilmutkaa. Kapasitanssilla tarkoitetaan laitteen varauskykyä. Silmutkoiden syntyyn vaikuttaa käytetty taajuus. Storey suosittelee monipiste-maadoitusta yli 10 MHz taajuudella toimiviin laitteisiin. Monipistemenetelmässä jokaisella osiolla on oma mahdollisimman lyhyeksi suunniteltu maalinja. (Storey et al. 2006, s. 343)

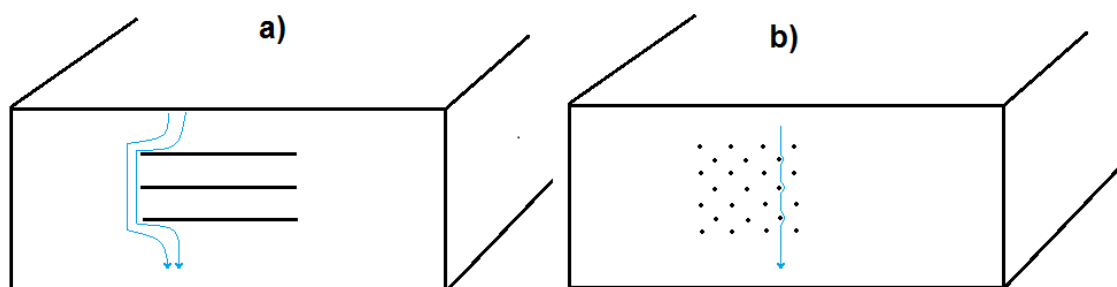
Virtapiirit suojataan yleensä asettamalla sähkömagneettiselta säteilyltä suojaava materiaali häiriölähteen ja piirin väliin, tai ympäröimällä piiri kokonaan suojamateriaalilla. Wang et al. tutkivat kolmiulotteista suojausmenetelmää, jossa piirin jokainen komponentti suojataan erikseen. Muuttamalla piiri kolmiulotteiseksi ei piirilevyä enää tarvita, ja komponentit voidaan pakata entistä tiiviimmin. Kokoa pienennettäessä systeemin sisäisten sähkömagneettisten häiriöiden uhka kasvaa. Wang et al. jakoivat piirin pieniin suojattuihin tiloihin, jotka olivat kaikki suojattuna sähkömagneettiselta säteilyltä erikseen. Tutkijat käyttivät jokaisesta erillisestä suojatusta tilasta nimitystä huone. Piirin sisäistä häiriötä aiheuttavat komponentit lokeroitiin kaikki omiin huoneisiinsa, samalla sisäisten häiriöiden määrä väheni. Menetelmä on normaalia piirilevyn valmistusta monimutkaisempi toteuttaa, mutta virtapiirien koon pienentyessä elektroniikan käyttökoh-teissa voi kolmiulotteinen toteutus tulla jossain vaiheessa entistä suositummaksi. (Wang et al. 2006, s. 1)

4.1.6 Suojakotelointi

Paras ratkaisu paljon häiriötä lähettävien lähteiden tapauksessa on sähkömagneettisen suojakotelon käyttäminen. Täydellinen suoja olisi täysin suljettu kotelo, mutta tämän tyyppisen ratkaisun käyttäminen yleensä estää laitteen toiminnan ja sen havainnoinnin mahdollisuuden. Ratkaistavia ongelmia koteloa käytettäessä ovat erilaiset liitokset, aukot, sekä johdinten vedot kotelossa. (Practical Em Shielding, s. 3)

Laitteiden koteloidissa olevat aukot johtuvat yleensä ilmastoinnista, erilaisista näytöistä, muoviosista tai tukirakenteesta. Suuret aukot lisäävät suojan impedanssia johtavalla pinnalla. Sähkömagneettisen suojauksen kannalta paras ratkaisu tuuletusaukkojen kannalta on monesta pienestä reiästä koostuva ritalä. Kuvassa 4.5 on esitetty viivamaisilla ja

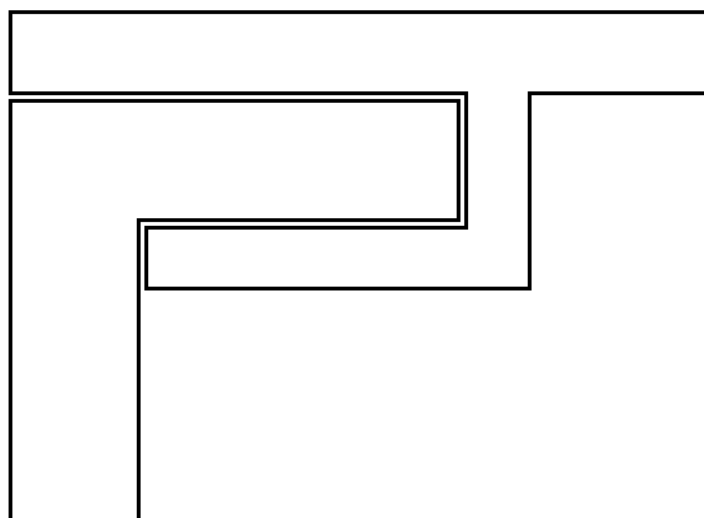
aukkomaisilla rakenteilla luodun tuuletuksen vaikutus sähkövirran kulkuun laitteen pinnalla. Laitteen a) ilmastointiaukot estävät enemmän virrankulkua kuin laitteen b). Suojauksen kannalta on tärkeää, että kotelon aukkojen koko on suhteessa pieni suojattavan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuteen. (Practical Em Shielding, s. 4)



Kuva 4.5. Laitteiden a ja b ilmastointi aukkojen vaikutus virrankulkuun laitteiden pinnalla. Virran reitti on esitetty sinisillä nuolilla

Usein monimutkaisen muotoisia suojia ei saada rakennettua vain yhdestä kappaleesta. Suojien saumakohdat ovat sähkömagneettisen suojauksen kannalta ongelmallisia. Saumat ovat usein yhteen suuntaan pitkiä ja mahdollistavat säteilyn vuotamisen suojan läpi. Heikosti suunnitellut suojat voivat toimia antennina ja vahvistaa säteilyä. (Practical Em Shielding, s. 4)

Pelkästään kitkan avulla vierekkäin kiinni olevat metallikappaleet eivät anna tarvittavaa suojausta. Hapettuminen ja korroosio vähentävät metallien kontaktia toisiinsa. Ruuvien tai pulttien avulla metallien kiinnitys on kyseisestä kohdasta toimiva, mutta välikohdissa suoja saattaa rakoilla. Metallit voivat myös taipua ruuvien vaikutuksesta. Kuvassa 4.6 on esitetty limittäin rakennettu sauma. Saumojen impedanssia voidaan laskea myös käyttämällä johtavaa tiivistettä. (Practical Em Shielding, s. 4)



Kuva 4.6. *Limittäinen saumaus sähkömagneettisessa suojauksessa.*

Monet laitteet tarvitsevat toimiakseen ulkoisen virtalähteen sekä väylän datan kulkemiselle laitteeseen ja siitä pois. Epäonnistunut johdotus saattaa tehdä muusta sähkömagneettisesta suojauksesta täysin turhaa. Johtojen tulee olla hyvin suojattuja tai niiden tulee olla samassa potentiaalissa suojan kanssa. Monta kertaa suojakotelossa on erillinen suojaosio kaapeleita varten. Haitalliset signaalit voidaan myös poistaa käyttämällä erillistä suodatinta. Suotimen tulee olla mahdollisimman lähellä suojattavaa laitetta suojakotelossa tai mahdollisesti integroituna kiinni suojattavaan laitteeseen. (Practical Em Shielding, s. 5)

4.2 Kankaat

Sähkömagneettiselta säteilyltä suojaavat vaatteet valmistetaan lisäämällä metallia kankaaseen. Vaate voidaan päällystää metallilla tai valmistaa osittain metallisista kuiduista. Suojaavissa vaatteissa käytetään pääasiassa hopeaa ja kuparia. Sähkömagneettiselta säteilyltä suojaavan vaatteen tulee antaa suoja säteilyä vastaan, samalla aiheuttaen mahdollisimman vähän haittaa vaatteiden pitäjälle. Erityistä huomiota suojaavia vaatteita suunniteltaessa on osoitettava niiden käyttäytymiselle vahvoissa sähkömagneettisissa kentissä. Erityisiä vaaran paikkoja ovat kohdat, joissa vaate hankautuu itseään vasten kuten rypyt ja kainalon kohta kättä liikuttaessa. Pahimmassa tapauksessa syntyvä valo-kaari polttaa reiän kankaaseen ja vahingoittaa vaatteiden käyttäjää. Taulukossa 4.1 on tarkasteltu lähemmin eri sähkömagneettiselta säteilyltä suojaavien vaatteiden koostumusta. (Neelakanta et al. 1995, s. 454)

Taulukko 4.1. Suojauksessa käytettyjen kankaiden suojausarvoja eri taajuuksilla.

Koostumus	Keskimääräinen pintaresistanssi (ohm/m²)	Kuidun koko (μm)	SE(dB) f = 4GHz	SE(dB) f = 10 GHz
75 % villaa 25 % johtavia kuituja	~1.0	~10.0	48	43
85 % polyes- teri 15 % johtavia kuituja	~8.0	~8.0	43	42
85 % synteet- tistä kangasta 15 % ruos- tumatonta terästä	~65.0	~7.5	41	38
90 % synteet- tistä kangasta 10 % ruos- tumatonta terästä	~55.0	~7.5	33	37

Muroga et al. tarkastelivat synteettisistä kuiduista valmistettujen kankaiden ominaisuuksia sähkömagneettisessa suojauksessa. Tutkitut kankaat oli valmistettu kahdesta eri paksuisesta kuidusta, jotka oli päällystetty metallilla. Muroga et al. mukaan kankaiden resistanssiin pystyy vaikuttamaan muuttamalla kuitujen etäisyyttä toisiinsa (kaava 15). Kangas oli valmistettu sijoittamalla eri paksuisia kuitukerroksia vuorotellen. Kuvassa 4.7 on esitetty kankaan resistanssin suhde SE-arvoon 3 GHz:n taajuudella. Suojaustehokkuus nousee resistanssin pienentyessä, johtuen heijastushäviön kasvusta. (Muroga et al. 2014, s. 135)

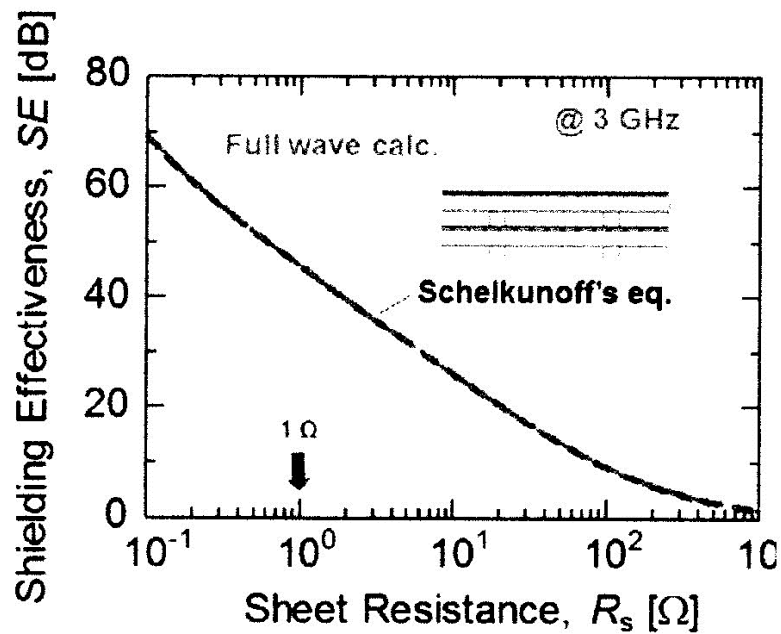
$$R_S = \rho_S / t_S \quad (15)$$

jossa

R_S = Kankaan resistanssi (Ω)

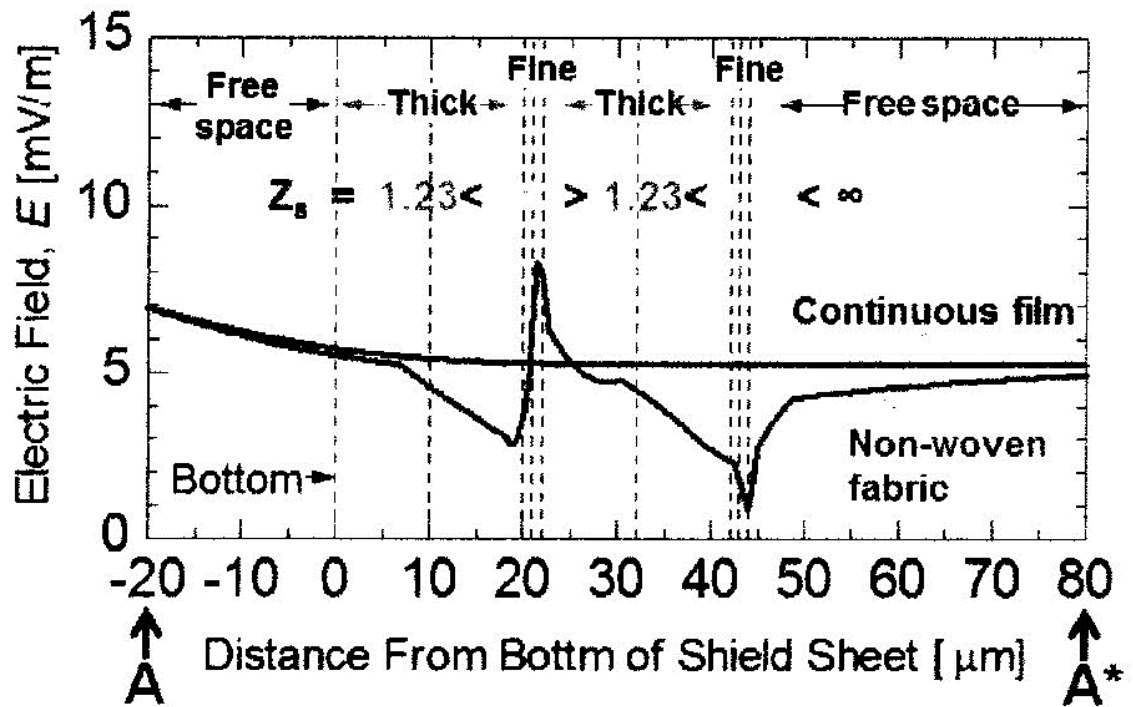
ρ_S = Metallin ja ilmarakojen aiheuttama keskimääräinen resistiivisyys (Ωm)

t_S = Kankaan paksuus (m)



Kuva 4.7. Resistanssin vaikutus suojaustehokkuuteen 3 GHz:n taajuudella. (Muroga et al. 2014, s. 136)

Heijastushäviö on suurimmillaan kankaan ohuista kuiduista valmistetussa osassa. Ilmiö selittyy matalammalla impedanssilla kankaan ohuemmissa kuiduista valmistetussa osassa. Kuvassa 4.8 on esitetty sähkökentän voimakkuus kankaan eri kohdissa. Impedanssit ovat tässä tapauksessa $0,48 \Omega$ ohuella ja $1,23 \Omega$ paksummalla kankaalla. (Muroga et al. 2014, s. 136)



Kuva 4.8. Sähkökentän muodostus kankaan sisällä eri kerroksissa. (Muroga et al. 2014, s. 136)

Johtavia kankaita voidaan valmistaa myös itsellään johtavista polymeereistä. Lupaavia muoveja ovat esimerkiksi polyaniliini ja polypyrroli. Toisin kuin metallit, itseisjohtavat polymeerit eivät menetä sähköisiä ominaisuuksiaan korroosion myötä. Polymeerit ovat metalleihin verrattaessa kuitenkin hauraita ja kalliita valmistaa. Polymeerit reagoivat ilmassa olevien kemikaalien kanssa ja menettävät ajan kuluessa osan sähköisistä ominaisuuksistaan. Polymeeri voidaan päällystää ilmalta suojaavalla laminaattikerroksella. (Wan 2008, s. 78)

4.3 Maalit

Sähkömagneettinen suojaus voidaan toteuttaa johtavilla maaleilla. Päällystettäviä pintoja ovat usein huonosti johtavat materiaalit kuten puu, muovit ja keraamiset materiaalit. Maali saadaan johtavaksi lisäämällä siihen johtavia hiukkasia. Johtavana materiaalina käytetään usein hopeaa. Johtava maali voidaan levittää suojattavalle pinnalle samoin keinoin kun normaali maali. Muovisten koteloiden käyttö elektroniikassa on lisännyt tarvetta suojata komponentteja johtavilla maaleilla. Johtokyvyn lisäksi maaleilta vaaditaan muitakin ominaisuuksia. Maalin tulee säilyttää koostumuksensa vaadituissa lämpötiloissa. Maalin tulee suojata pintaa ympäristöltä ja kestää mekaanista kulutusta. Maalattu pinta mahdollistaa myös yksinkertaisen maadoitusratkaisun. Maalikerroksen paksuutta muuttamalla voidaan vaikuttaa suoraan pinnan johtavuuteen. (Neelakanta et al. 1995, s. 463)

Partikkelien määrä, muoto, koko ja valittu aine ovat ratkaisevassa osassa tarkasteltaessa maalin johtavuutta. Maaleihin valitaan usein korroosiota ja hapettumista kestäviä aineita. Partikkelien pinnan hapettuminen on ongelma esimerkiksi alumiinipartikkeleita sisältävissä maaleissa. Hapettuminen lisää maalipinnan resistanssia. Hopeaa sisältävät maalit ovat johtavia ja kestävät hyvin varastointia. Kuparipitoiset maalit johtavat hyvin, mutta korroosio ja hapettuminen vaikuttavat nopeasti maalin johtavuuteen. Maaleja varten on kehitetty korroosiota vastaan pintakäsiteltyjä kuparihiukkasia. Kulta olisi hintaa lukuun ottamatta eräs parhaista johtavista materiaaleista niin johtavuuden kuin korroosionkeston kannalta. Erityisen vaativissa olosuhteissa maaleissa voidaan käyttää nikkeliä. Nikkelin johtavuus on huomattavasti heikompia kuin muiden maaleissa käytettyjen metallien, mutta se kestää vaativia olosuhteita, eikä johtavuus laske nopeasti ajan kuluessa. Grafiittia käytetään maaleissa sen kemiallisten ominaisuuksien vuoksi, vaikka sen johtavuus on alhainen verrattessa yllä mainittuihin metalleihin. Grafiittia sisältävän maalin pinnan kestävyys on heikko, eikä sitä käytetä yleensä kuluttajille suunnattujen tuotteiden pinnoitteena. (Neelakanta et al. 1995, s. 463)

4.4 Ikkunoiden suojaus sähkömagneettiselta säteilyltä

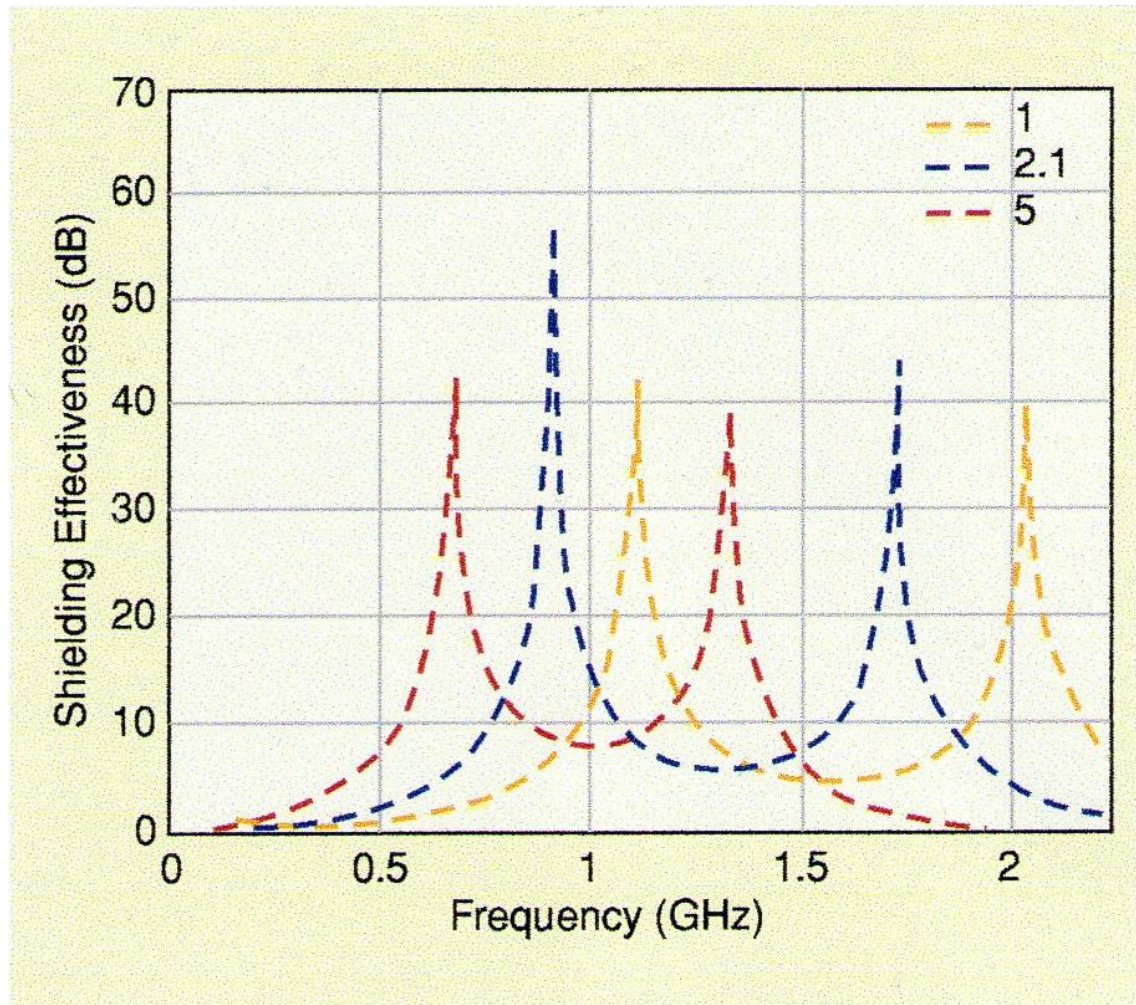
Rakennuksia ja huoneita voidaan suojata sähkömagneettiselta säteilyltä monenlaisilla sähkömagneettisilla suojilla. Vaikeimpia kohtia suojata ovat rakennusten ikkunat. Lasi- en suojaus on usein kompromissi suojaustehokkuuden ja läpinäkyvyyden välillä. D'Amore et al. suorittivat tutkielman lasien suojauksesta eri menetelmin. Suojaus voidaan toteuttaa metallisin verkoin tai johtavien kalvojen avulla. Metalliverkot rajoittavat kalvoa enemmän lasin läpinäkyvyyttä. Kalvoissa voidaan johtavana materiaalina käyttää esimerkiksi kulta, hopea tai indiumtinaoksidia (ITO). Hopea rajoittaa ITO:a enemmän ikkunan läpäisevyyttä, mutta tarjoaa myös paremman suojan säteilyä vastaan. Ikkunoihin kiinnitettäviä kalvoja voidaan käyttää myös lämmöneristämiseen. Tehokkain suojaus saadaan käyttämällä monikerroksisia kalvoja. (D'Amore et al. 2009, s. 1–4)

4.5 Matkapuhelimet

Matkapuhelimet ovat nykyään yksi yleisimmistä sähkömagneettisen häiriön lähteistä. Ünal et al. arvioivat ihmisen aiheuttaman sähkömagneettisen häiriön miljoonakertaistuneen viimeisten vuosikymmenien aikana. Häiriöitä vastaan on helpompaa suojautua, kun häiriön taajuus tiedetään tarkalleen. (Ünal et al. 2006, s. 48)

Useimmat matkapuhelimet toimivat 900 MHz:n tai 1800MHz:n taajuudella. Ünal et al. keskittyivät suojaamaan herkkiä komponentteja häiriölähteen eristämisen sijaan. Suojaa- va malli on vaativampi toteuttaa, mutta se voi tarjota suojaa muiltakin sähkömagneettisen häiriön lähteiltä. Tutkijat toteuttivat suojauksen käyttämällä taajuusvalinnaista suo- jaustekniikkaa FSS (Frequency-Selective Surface). Tekniikkaa voidaan käyttää, kun tiedetään tarkasti suojattavat taajuudet. FSS-tekniikan avulla luodaan suoja yhdelle tai

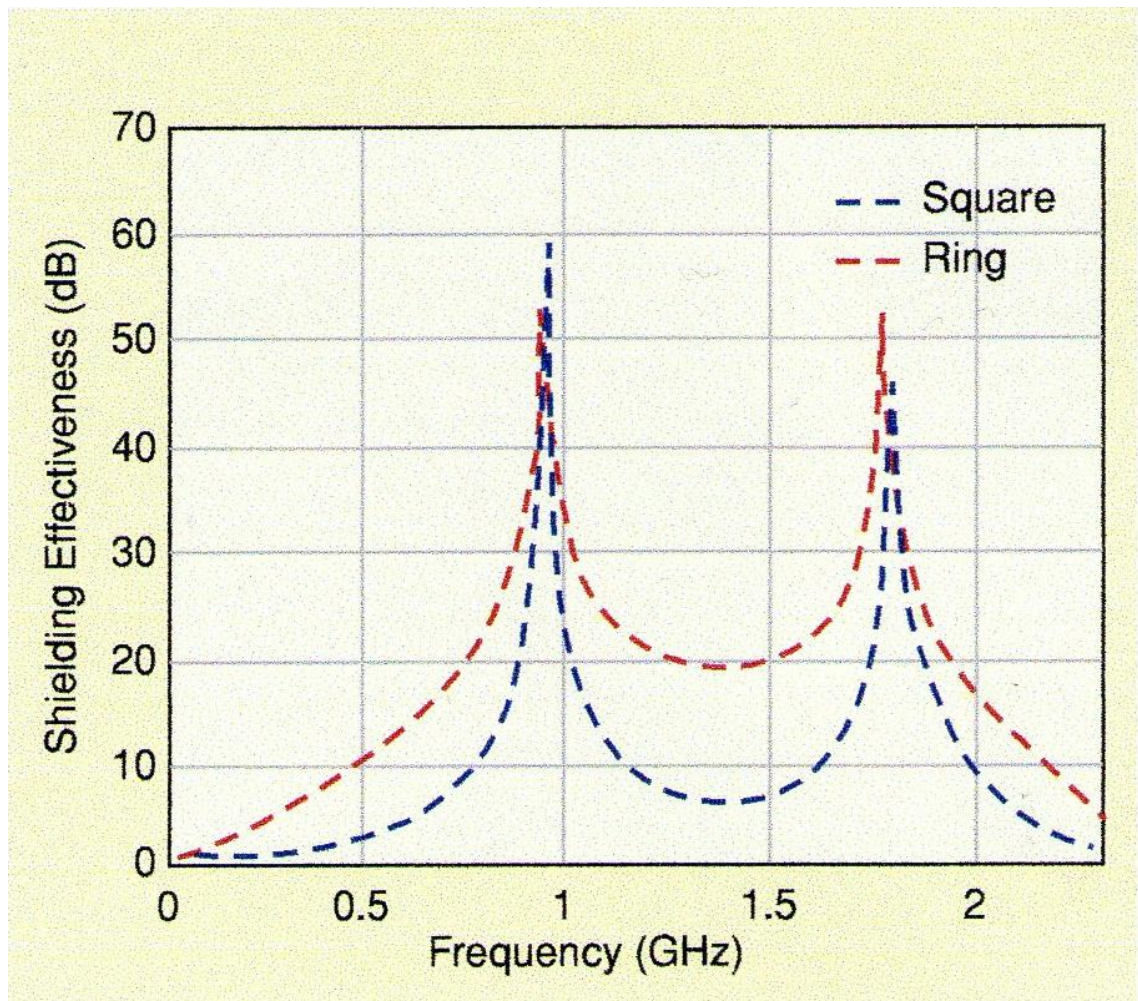
useammalle taajuudelle. Suojat koostuivat metallilevyistä, sekä dielektrisestä materiaalista. Ünal et al. testasivat sekä pyöreitä että nelikulmion muotoisia suoja. Nelikulmion muotoisten suojien tapauksessa tulee ottaa huomioon suunta, josta sähkömagneettinen säteily saapuu suojamateriaaliin. Levyjen asettelulla voidaan vaikuttaa johtuviin ja heijastuviin aallonpituuksiin. Dielektrisen materiaalin permittiivisyyden nostaminen laskee suojan resonanssitaajuutta. Kuvassa 4.9 on esitetty resonanssitaajuuksien muutos eri permittiivisyyksillä. (Ünal et al. 2006, s. 49–50)



Kuva 4.9. Suojaustehokkuuden huippuarvot vaihtelevat materiaalin permittiivisyyden mukaan. Permittiivisyyden nostaminen laskee resonanssitaajuuksien sijaintia. (Ünal et al. 2006, s. 51)

Ünal et al. tutkivat aaltoja, joiden magneettikenttä (TM-aalto) sekä sähkökenttä (TE-aalto) olivat kohtisuoria suojan pinnan suuntaan. Suojan tehokkuus riippui myös kulmasta, jossa aalto osui suojaan. Ünal et al. havaitsivat häiriön saapumiskulman vaikuttavan enemmän pyöreään kuin nelikulmion muotoiseen suojaan. Tutkijat saavuttivat FSS-tekniikalla 60 dB suojaustehokkuuden 900MHz:n taajuudella, sekä 40 dB suojaustehokkuuden 1800 MHz:n taajuudella. Nelikulmion muotoisen suojan SE-huippuarvot ovat korkeammat kuin pyöreän. Mikäli saapuvan häiriön taajuus ei ole tarkasti tiedossa,

tehokkaampi suojaus saadaan pyöreällä FSS-suojauksella. Kuvasta 4.10 esitetään pyöreän suojan korkeammat suojausarvot resonanssitaajuuksien välillä. (Ünal et al. 2006, s. 51–54)



Kuva 4.10. Pyöreän suojan SE-arvot ovat korkeammat kuin nelikulmaisen, tarkasteltaessa resonanssitaajuuksien välejä. (Ünal et al. 2006, s. 51)

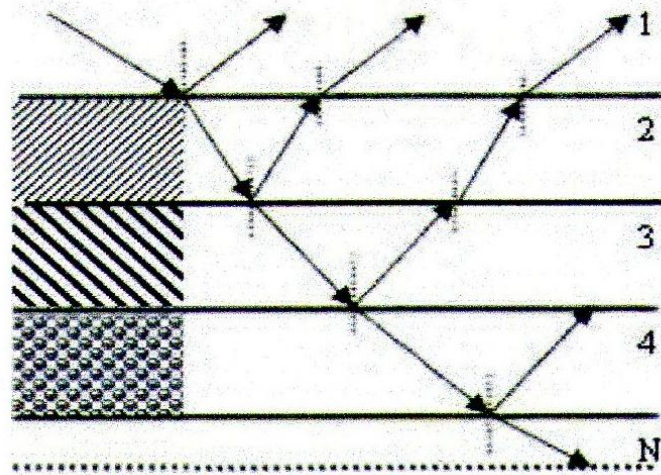
4.6 Häiveteknologia

Häivelaiteilla tarkoitetaan yleisesti sensoreissa näkymättömiä laitteita. Häiveteknologia on kehitetty alkujaan sotilaskäyttöä varten ja siitä käytetään usein englanninkielistä ilmaisua stealth. Tekniikkaa on käytetty sukellusveneissä ja lentokoneissa jo pitkään. Uudempia häivetekniikalla suojattuja sovelluksia ovat ohjukset sekä miehittämättömät lennokit. Näistä käytetään nimitystä viidennen sukupolven häivelaite. (El Diwiny et al. 2014, s 101)

Tutka on laite, joka lähettää radioaaltoja ja tarkastelee kohteesta saapunutta kaikusignaalia. Häiveteknologialla pyritään estämään kaikua häivelaitteesta takaisin vastaanottimeen. Tekniikka perustuu usein muotoiluun, materiaalivalintaan sekä erilaisiin kerroksiin signaalia vaimentavaa materiaalia. Myös kohteen lämpö- ja äänisignaaleilla voidaan paljastaa häiveteknologialla suojattu laite. (El Diwiny et al. 2014, s 101)

Häiveteknologia ei tee konetta usein täysin näkymättömäksi tutkassa. Riippuen koneen muotoilusta ja suuntauksesta tutkaan, saattaa tutka tunnistaa häivelentokoneen isoksi linnuksi. Koneen muotoilulla pyritään estämään signaalin heijastumista vastaanottimeen. Koneen hyvin heijastavat osat kuten pommilasti, moottorit ja laskuteline ovat lennon aikana piilossa koneen kuoren sisällä. Aikaisemmin häivelentokoneita käytettiin lähinnä pommittamiseen ja tiedusteluun. Koneen häiveominaisuudet ovat monessa tilanteessa tehokkaimmillaan lennettäessä suoraan kohti tutkaa. Tutkan yli lennettäessä koneen häive- ominaisuudet heikkenevät ja paljastuminen on todennäköisempää. (El Diwiny et al. 2014, s 102), (Baker et al. 2003, s. 3)

Häive ominaisuuden tehokkuutta mitataan RCS-arvolla (Radar Cross Section). Heijastusta poispäin vastaanottimeesta ohjaavan muotoilun lisäksi häivelaitteet on usein päällystetty tutka-aaltoja vaimentavalla RAM-materiaalilla (Radar Absorbent Material). Monet RAM-materiaalit kuuluvat niin sanottuihin metamateriaaleihin. Näiden päällysteiden ominaisuuksiin kuuluvat negatiivinen permittiivisyys ja permeabiliteetti. Aineista käytetään myös nimityksiä kaksoisnegatiivinen materiaali DNG (Double Negative) tai vasen- käinen materiaali LHM (Left-handed). Materiaaleja käytetään yleensä kerroksittain sähkö heikosti johtavien kalvojen kanssa. Kuvassa 4.11 on esitetty aallon tunkeutuminen ja heijastuminen monikerroksisessa RAM-materiaalissa. Syväälle monikerros-materiaaliin siirtynyt aalto ei heijastu ulos aineesta, vaan vaimenee materiaalin sisällä. Kalvot voivat olla toimintaperiaatteeltaan resonoivia, jolloin ne pysäyttävät tutka-aallot vain suunnitellulla taajuusvälillä. Ilman resonanssia toimivat RAM-materiaalit muuttavat tulevan aallon lämpösäteilyksi. Nämä materiaalit estävät havainnoin riippumatta tutkan käyttämästä taajuudesta. Huonona puolena syntynyt lämpösäteily saatetaan havaita infrapunasensoreilla. LH-materiaaleille on myös sovelluksia häivetekniikan ulkopuolella. Menetelmää voidaan soveltaa esimerkiksi signaalien ohjaamiseen, estämiseen ja kohdentamiseen pienikokoisten antennien yhteydessä. (El Diwiny et al. 2014, s 101), (Yang et al. 2010, s. 129)



Kuva 4.11. Sähkömagneettisen aallon heijastuminen ja vaimeneminen monikerroksisen RAM-materiaalin rajapinnoilla. (Yang et al. 2010, s. 129)

Uudet häivetekniikat ovat pakottaneet tutkijoita keksimään myös uusia havainnointimenetelmiä. Baker et al. ovat tutkineet monista pienistä tutka-asemista koottujen verkkojen käyttöä häivekohteiden havainnointiin. Aerodynamiikasta johtuen lentokoneet eivät voi olla samanmuotoisia kaikista tarkastelusuunnista. Häiveteknologialla varustetuilla laitteilla on eri RCS-arvo riippuen tutkan suunnasta suhteessa kohteeseen. Koneet on nykyään suunniteltu vastustamaan havainnointia parhaiten suoraan edestäpäin. Koneen ylittäessä tutka-aseman sen RCS-arvo muuttuu huomattavasti. Käyttämällä tutkien muodostamaa verkkoa saadaan häivelaitte ylittämään useampia tutka-asemia kuin jos käytettäisiin vain yhtä laajempaa aluetta tarkastelevaa tutkaa. Häivelaitteet suunnitellaan ohjaamaan tutkan heijastunut aalto pois päin vastaanottimesta. Mikäli tutkaverkosto toimii synkronoituna samalle taajuudelle pystyvät tutkat tulkitsemaan muiden tutkien heijastunutta signaalia. Nykyään on kehitteillä monia menetelmiä paljastaa häivelaitte. Lasersäteen tai mikroaaltojen avulla pyritään tulevaisuudessa nostamaan häivelaitteen sähköistä permittiivisyyttä, samalla vähentäen aallon vaimenemista RAM-materiaalissa. (El Diwiny et al. 2014, s. 106), (Baker et al. 2003, s. 4), (Yang et al. 2010, s. 129)

5. ORGANISAATIOT JA LAINSÄÄDÄNTÖ SÄHKÖMAGNEETTISESSA SUOJAUKSESSA

5.1 Organisaatiot sähkömagneettisessa suojauksessa

5.1.1 IEC

Kansainvälinen sähkötekniinen komissio IEC (International Electrotechnical Commission) pitää huolta kansainvälisistä standardeista elektroniikan alalla. Järjestö koostuu monien teollisten maiden kansallisista sähköteknisistä komiteoista. IEC pyrkii edistämään kansainvälistä yhteistyötä elektroniikan standardoinnin alalla. IEC antaa ehdotuksensa kansallisille komiteoille, jotka päättävät yksilöllisesti kyseisissä maissa käyttöön otettavista standardeista. Isossa Britanniassa IEC-standardeista oli käytössä 85 % vuonna 2000. Sähkömagneettinen suojaus on yksi tärkeimmistä vaatimuksista nykypäivän elektroniikassa. Kaksi IEC:n komiteoista tutkii täysipäiväisesti sähkömagneettista yhteensopivuutta ja noin neljässäkymmenessä muussa aiheita tarkastellaan osittain. Lyhennettä TC77 käyttävä komitea tunnetaan englanninkielisellä nimellä "Electromagnetic compatibility between equipment including networks". Toinen EMC-ilmiötä tutkiva komitea on nimeltään CISPR, lyhenne tulee ranskan kielen sanoista "Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques". CISPR tutkii radiohäiriöitä ja niiden mittausta. (Williams et al. 2001, s. 47.)

5.1.2 Tukes

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) on suomalainen eri tekniikan alojen turvallisuutta valvova elin. Tukes keskittyy toiminnassaan eri tekniikan aloilla esiintyvien vaarojen ja haittojen minimointiin. Tukes on vastuussa Suomessa voimassaolevasta tekniikanalojen lainsäädännöstä. Tukes koostuu viidestä yksiköstä. Sähkömagneettisten häiriöiden rajoittaminen kuuluu Tukesin tuote- ja laitteistovalvonnalle. Yksikkö huolehtii sähkölaitteiden asentamisesta, käytöstä ja valvonnasta. (TUKES)

5.1.3 Säteilyturvakeskus

Säteilyturvakeskus eli STUK on Suomessa toimiva säteilyturvallisuudesta vastaava elin. STUK:in toimialaan kuuluvat sekä ionisoivat että ionisoimattomat säteilyt. Vuoden 2013 lopussa keskuksella oli 347 työntekijää. STUK on sosiaali- ja terveysministerin alainen organisaatio. Säteilyturvakeskus pyrkii ennalta ehkäisemään, havaitsemaan sekä torjumaan säteilystä aiheutuvia haittoja Suomessa. Organisaatio toimii yhteistyössä työ- ja terveysturvaviranomaisten kanssa tarkasteltaessa haitallisia tai vaarallisia sähkömagneettisen säteilyn lähteitä. Arviot säteilyn sallimisesta esimerkiksi teollisuudesta perustuvat vuonna 1992 säädettyyn säteilylakiin. Laissa verrataan säteilystä aiheutuvia hyötyjä ja haittoja. Säteilyturvakeskus toimii yhteistyössä monen Euroopan maan säteilyturvaviranomaisten kanssa. (STUK)

5.2 EMC-direktiivi

EMC-direktiivin tarkoitus on varmistaa sähköisten laitteiden yhteensopivuus Euroopan maissa. Direktiivi on laadittu suojaamaan laitteiden ostajaa, sekä auttamaan valmistajaa täyttämään sähkömagneettisen yhteensopivuuden vaatimukset. Kaupankäynnin yksinkertaistaminen sähkölaitteiden osalta on yksi direktiivin pääkohdista. (Williams et al. 2001, s. 22)

Direktiivin sisältö on muuttunut ajan kuluessa. Säännöt olivat direktiivin vanhemmissa versioissa huomattavasti tarkempia useiden laitteiden osalta. Nykyään direktiivi keskittyy laitteiden tärkeimpien vaatimusten toteuttamiseen. Direktiiviä muutetaan enemmistöäänestyksen perusteella. Tällä tavalla varmistetaan tarvittaessa nopea sääntöjen muutos. (Williams et al. 2001, s. 22)

5.3 CE-merkintä

Direktiivit koskevat monia sähkölaitteita, mutta poikkeuksiakin on monia. Amatöörradiot ovat yksi poikkeuksista. Armeijan varusteet eivät kuulu direktiivien määräysvaltaan. Mikäli samoja laitteita myydään kuluttajille, tulee niiden noudattaa määräyksiä. Opetusvälineet eivät sisälly direktiiviin. Edellytyksenä on, että välineiden käyttäjä huolehtii mahdollisista ongelmista ympäristössä. Monilla laitetyypeillä on omia määräyksiä, eivätkä nämä laitteet kuulu EMC-direktiivin alle. Näitä laitteita ovat muun muassa lääketieteelliset välineet, moottoriajoneuvot, ilmailulaitteet ja elektroniset mittalaitteet. Laitteen määritelmä itsessään ei ole yksiselitteinen. Komponentin katsotaan olevan laite, kun loppukäyttäjä pystyy suorittamaan esineen toimintoja ilman ylimääräisiä kytkentöjä järjestelmän sisällä. Mikäli laitteella ei ole selvää tarkoitusta loppukäyttäjälle, sen katsotaan olevan komponentti. (Williams et al. 2001, s. 27)

CE-merkinnällä laitteen valmistaja kertoo kuluttajalle laitteen olevan sopusoinnussa annettujen määräyksien kanssa. Merkintä tulee kiinnittää laitteeseen näkyvälle paikalle.

Mikäli merkintää ei ole mahdollista kiinnittää laitteeseen tulee CE-merkki lisätä ohjekirjaan tai pakkaukseen. Merkintä kertoo laitteen noudattavan myös muita tuotteeseen vaikuttavia direktiivejä EMC-direktiivin lisäksi. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden julistaminen tuotteelle on moniosainen prosessi. Valmistajan tulee selvittää tarkasti mille laitteelle luvattu yhteensopivuus on tarkoitettu. Tuotteen tulevat päivitykset saattavat aiheuttaa muutoksia sähkömagneettisessa yhteensopivuudessa. Valmistajalla tulee olla vastuuhenkilö, joka pitää huolen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. Monimutkaisten tuotteiden tapauksessa kyseisen henkilön tulee usein luottaa kehittäjien ja testaa- jien sanaan. Valmistajan tulee määritellä tuotteen toiminta. Parhaimmassa tapauksessa jokaisen tuotteen toiminnasta tehdään oma toimintatesti. CE-merkinnän laillisuus on lopulta valmistajan vastuulla. (Williams et al. 2001, s. 29)

5.4 EMC-standardit

Kehityksen ollessa nopeaa myös standardien on oltava nopeasti muunnettavissa. Suomessa standardit jaotellaan maailmanlaajuisiin, eurooppalaisiin ja kotimaisiin standardeihin. Standardi voi vaikuttaa tuotteeseen tuotekohtaisesti tai yleisellä tasolla. IEC on kansainvälinen sähkötekniikan standardoimisjärjestö, mutta myös esimerkiksi ISO:n yleiset standardit tai telealalla toimivan ITU:n standardit vaikuttavat elektronisiin laitteisiin. (Korhonen et al. s. 9)

Suomessa SESKO ry välittää eurooppalaiset sähkötekniikan standardit osaksi suomalaisia standardeja. SESKO on Suomen standardoimisliitto SFS:n jäsen. Standardin numerointi paljastaa kyseisen standardin alkuperän. Numerolla 60 viitataan maailmanlaajuisiin standardeihin ja numerolla 50 standardin alussa tarkoitetaan alkujaan eurooppalaisia standardeja. (Korhonen et al. s. 10)

6. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena on antaa lukijalle selkeä kuva sähkömagneettisten häiriöiden synnystä ja merkityksestä modernissa ympäristössä. Työssä käydään läpi monia sähkömagneettiseen suojaukseen liittyviä ilmiöitä, sekä selvitetään suojauksen toimintaa sähkömagneettisen säteilyn kulkiessa aineen läpi. On tärkeää ymmärtää, että sähkömagneettisen yhteensopivuuden on toimittava kumpaankin suuntaan. Yhteensopivuus on muutakin kuin laitteen toiminnan varmistamista häiriöitä sisältävässä ympäristössä. Laite ei itse saa estää muiden laitteiden normaalia toimintaa tai aiheuttaa vaaraa ympäristölle.

Nykyään suurin osa ympärillämme olevasta säteilystä on peräisin ihmisen toiminnasta aiheutuvista lähteistä. Luonnolliset lähteet kuten salaman iskut, kosminen säteily ja auringon purkaukset ovat vähäisemmässä roolissa, mutta sähkömagneettisella suojauksella voidaan varautua myös luonnollisia lähteitä vastaan. Sähkömagneettinen häiriö siirtyy säteilemällä ja johtumalla. Heikot kohdat suojauksessa toimivat sekä sisään- että ulostulo-kohtana säteilylle.

Käytetyimpiä aineita sähkömagneettisessa suojauksessa ovat erilaiset metallit. Pienet laitteet voidaan ympäröidä metallisilla koteloidilla, mutta suurempien kohteiden ulkokuori kannattaa päällystää metallikalvolla. Yleisimpiä suojametalleja ovat kupari, alumiini ja hopea. Sähkömagneettinen suojaus voidaan toteuttaa myös hiilinanoputkien muodostaman verkoston avulla. Hiilinanoputkiin sisällytetään johtavaa materiaalia. Menetelmää käytetään kun halutaan luoda kevyt ja mekaanisesti kestävä sähkömagneettinen suoja.

Muoveja käytetään usealla eri tavalla sähkömagneettisena suojana. Polymeerien sähköisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäämällä materiaaliin johtavia partikkeleita tai lastuja. Toinen menetelmä on käyttää itseisjohtavia polymeerejä. Muoveja käsitellään douppaamalla. Menetelmässä elektroneja lisätään tai poistetaan materiaalista. Syntyneet aukkopaidat mahdollistavat sähkövirran siirtymisen materiaalisissa. Eräs käytetyimmistä itseisjohtavista polymeereistä on polyaniliini, jota valmistetaan monista muista johtavista polymeereistä eroten protonidouppauksella.

Sähkömagneettinen suojaus on helpoiten toteutettavissa jo laitteita suunniteltaessa. Heikoimpia kohtia suojauksessa ovat usein saumakohdat, tuuletusaukot, pitkät kaapelit sekä niiden kiinnityskohdat laitteeseen. Limittäisellä suojakotelon muodolla voidaan estää sähkömagneettisten häiriöiden kulkua. Nykyään monet kohteet vaativat häiriötöntä ympäristöä. Sähkömagneettinen suoja voidaan nykyään sisällyttää muun muassa kankaisiin ja maaleihin. Sähkömagneettista suojausta tarvitaan myös monissa armeijan varusteissa.

Toimintavarmuuden lisäksi, myös häiveteknologia vaatii kehittynyttä sähkömagneettista suojausta toimiakseen.

Monet sähkömagneettisessa suojauksessa käytetyistä säännöistä ovat kansainvälisen International Electrotechnical Commissionin käsialaa. Kansalliset järjestöt valitsevat jokaisessa maassa käyttöön otettavat standardit. Suomessa sähkötekniikan standardeista vastaa SESKO ry. Yhteisillä säännöillä pyritään varmistamaan sähköisten laitteiden turvallinen ja häiriötön käyttö. Euroopassa käytössä olevan EMC-direktiivin avulla pyritään varmistamaan tuotteiden vapaa liikkuvuus maiden välillä. Tulevaisuudessa on tärkeää, että säännöt ja määräykset pysyvät ajan tasalla aina kehittyvän tekniikan kanssa.

7. LÄHDE

LÄHTEET

- Al-Shabib, W., Lachowich, S. W. (2013). Modelling of Intrinsic Conducting Polymer for Wi-Fi Electromagnetic Interference Shielding, Science and Information Conference 2013, United Kingdom, pp. 836-838.
- Babcock, L.F. (1966). Shielding Cirquits from EMP, USA, pp.45-48.
- Badic, M., Marinescu, M-J. (2003). A Method to Display and Measure Reflection and Absorption Loss in Electromagnetic Shields, IEEE, pp. 517-520.
- Baker, C.J., Hume, A.L. (2003). Netted Radar Sensing, IEEE AECS Systems Magazine, February 2003, pp.3-6.
- Callister, W. D. Jr. (2000). Materials Science and Engineering An Introduction, USA, John Wiley & Sons, Inc., 871p.
- Cheng, D.K. (1993). Fundamentals of Engineering Electromagnetics. International Edition, USA, Addison-Wesley Publishing Company, inc. 474 p.
- Chung, D. D. L. (2003). Composite materials: Science and Applications, Functional Materials for Modern Technologies, USA, Springer, 289p.
- D'Amore, M.D., Greco, S., Lampasi, D.A., Sarto, M.S., Tamburrano, A. (2009). A New Structure of Transparent Films for Heat Control and Electromagnetic Shielding for Windows, Sapienza University of Rome, Italy, pp.1-4.
- El Diwiny, M.A., Hassanen, E-S., El-Sayed, A-H. M., Abouelmagd, G. (2014). New Anti Stealth technology for safe piloting of the Unmanned aerial vehicle, International Conference on Mechatronics and Automaton August 3-6, Tianjin, China, pp.101-106.
- Gupta, A., Choudhary, V. (2011). Electrical conductivity and shielding effectiveness of poly(trimethylene terephthalate)/multiwalled carbon nanotube composites, Springer, Journal of material Science 46, 2011, pp. 6416-6423.
- Han, M., Liang, D., Yan, B., Chen, L., Deng, L. (2006). Microwave electromagnetic properties of FeNi alloy particles composites doping with FeCuNiSiB nanocrystalline microwires, University of Electromagnetic Science and Technology of China, China, pp. 515.

Harper C.A., Sampson R.M. (1994). *Electronic Material & Processes Handbook*. Second Edition, USA, McGraw-Hill, Inc.

Hellier, C. J. (2003). *Handbook of Nondestructive evaluation*, USA, McGraw-Hill professional Publishing. 720 p.

Hoang, N.N., Miane, J-L., Wojkiewicz, J-L. (2006). Modeling of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multilayer Conducting Composites in the Microwave Band, pp.482-485.

Jalali, M., Wuthrich, R. (2009). Improving Electromagnetic Shielding of Composite Structures with Metallic Nanoparticles Synthesized by Electromagnetic Discharges, Mechanical and Industrial Department, Concordia University Montreal, Canada, pp. 1-4.

Jokela, K., Korpinen, L., Hietanen, M., Puranen, L., Huurto, L., Pättikangas, H., Toivo, T., Sihvonen, A., Nyberg, H. Säteilylähteet ja altistuminen, Saatavissa: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_9.pdf/d583d48c-c914-4593-a7bc-4d0e93415f85

Juutilainen, J., Huuskonen, H. Vältörajuisten kenttien vaikutuksia, Saatavissa: http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/kirjasarja/fi_FI/kirjasarja6/_files/12222632510021205/default/6_6.pdf (Haettu 27.4.2015)

Korhonen, E. EMC-suunnittelu ja testaus, Oulun yliopisto, Saatavissa: <http://www.ee.oulu.fi/~jari/EMCST/EMCST-L1-L2-L3.pdf> (Haettu 30.4.2015)

Kubacki, R., Ferenc, J., Przesmycki, R., Wnuk, M. (2009). The Nanocrystalline FeSiB-CuNb Finemet Absorption Properties at Microwaves, Poland, pp. 93-100.

Li, Z.W., Lin, G.Q., Wu, Y.P., Kong, L.B. (2009). High-Frequency Properties and Attenuation Characteristics of WBa Hexaferrite Composites With Doping of Various Oxides, National University of Singapore, Singapore, pp. 670-677.

Micheli, D., Laurenzi, S., Primiani, M., Moglie, F. Gradoni, G., Marchetti, M., Electromagnetic Shielding of Oriented Carbon Fiber Composite Materials, pp. 1-5.

Muroga, S., Asazuma, Y., Yamaguchi, M. (2014). Electromagnetic Shielding Effectiveness of Non-magnetic Metal Coated Non-woven Fabric Noise Suppressor, Japan, pp. 134-136.

Ngabonziza, Y., Li, J., Barry, C.F. (2011). Electrical conductivity and mechanical properties of multiwalled carbon nanotube-reinforced polypropylene nanocomposites, Springer-Verlag, Acta Mechanica 220, pp. 289-298.

Neelakanta, P.S. (1995). Handbook of Electromagnetic Materials: Monolithic and Composite Versions and Their Applications, USA, CRC Press. 591 p.

Oussaid, R. (2008). Electromagnetic shielding effect of chiral and typical materials, Houari Boumedienne university of science and technology, Algeria, pp. 321-325.

Oussaid, R. (2010). The electromagnetic shielding depending on material's parameters. Houar Boumediène University of Sciences and Technology, Algeria.

Park, S-H., Theilmann, P.T., Asbeck, P.M., Bandaru, P.R. (2010). Enchanted Electromagnetic Interface Shielding Through the Use of Functionalized Carbon-Nanotube-Reactive Polymer Composites, IEEE Transactions on Nanotechnology, Vol.9, No. 4, July 2010. pp. 464-469.

Practical Em Shielding, Saatavissa: <http://learnemc.com/practical-em-shielding> (Haettu 27.4.2015)

Ruuskanen, P. (2014a). Materiaaliominaisuuksien tutkimusmenetelmät, Kurssimateriaali, Tampereen teknillinen yliopisto, Pori.

Ruuskanen, P. (2014b). Älykkäät ja funktionaaliset materiaalit, Kurssimateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto, Pori. ss. 81-84, 100-103.

Shielding Theory, Saatavissa:

http://www.learnemc.com/tutorials/Shielding01/Shielding_Theory.html (Haettu 27.4.2015)

Storey, N. (2006). Electronic a Systems Approach. Third Edition, Great Britain, Pearson Education Limited. 645p.

STUK, Saatavissa: http://www.stuk.fi/stuk/fi_FI/index/ (Haettu 27.4.2015)

Takahashi, N., Nakazaki, S., Miyagi, D. (2010). Optimization of Electromagnetic and magnetic Shielding Using ON/OFF Method. IEEE Transactions on magnetics, Vol 46, No. 8, pp. 3153-3156.

TUKES, Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Tietoa-meista/tietoa-TUKESista/> (Haettu 1.9.2015)

Ünal, E., Gökçen, A., Kutlu, Y. (2006). Effective Electromagnetic Shielding, IEEE Microwave Magazine, August 2006, pp.48-54.

Wan, M. (2008). Conducting Polymers with Micro or Nanometer Structure, Germany, Springer-Verlag, 292 p.

Wang, X., Wang, H. (2006). The Innovative Research of Integrating Electromagnetic Shield into Tree-Dimensional Circuit, China, pp.1-7.

Williams, T. (2001). EMC for Product Designers, Third Edition, Great Britain, Newnes, 360p.

Wojkiewicz, J-L., Hoang, N.N., Redon, N., Miane, J-L. (2006). Intrinsically Conducting Nanocomposites: High Performance Electromagnetic Shielding Materials, France, pp. 58-61.

Wong, G., Rollin, J., Bhanji, R. Characterization of Electromagnetic Shield, Canada. pp. 110-113.

Yang, H-L., Xiao, T., Cheng, Y-Z., Li, M-H., Xiao, B-X., Zhang G-P. (2010). Em Scattering by Conductor Plate Coated with Multilayered Medium Having Metamaterials, China, pp. 129-131.

Yoon, J.K., Kyung, J.A., Kwang, S.S., Choi, H-D., Kwon, J.H., Chung, Y-C., Kim, W.N., Lee, A-K., Choi, J-I., Yoon, H.G. (2005). Hybridization of Oxidized MWNT and Silver Powder in Polyurethane Matrix for Electromagnetic Interference Shielding Application, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 4, November 2005. pp. 872-878.

Young, H.D., Freedman, R.A. (2004). Sears and Zemansky's University Physics: with Modern Physics. International Edition, 11. Edition, USA, Pearson Education. 1632 p.